

Universidad de Alcalá

Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería en Electrónica y Automática Industrial



Trabajo Fin de Grado

Desarrollo de herramientas de análisis de series temporales:
aplicación al estudio del potencial eólico en la Península Ibérica

ESCUELA POLITECNICA

Autor: Jesús Enrique Arnaiz Barrero

Tutor/es: Francisco José Álvarez García

2016

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería en Electrónica y Automática Industrial

Trabajo Fin de Grado

Desarrollo de herramientas de análisis de series temporales:
aplicación al estudio del potencial eólico en la Península Ibérica

Autor: Jesús Enrique Arnaiz Barrero

Tutor/es: Francisco José Álvarez García

TRIBUNAL:

Presidente: Dra. Dña. María José Ortiz Beviá

Vocal 1º: Dr. D. William Cabos Narváez

Vocal 2º: Dr. D. Francisco José Álvarez García

FECHA: 28/09/2016

A Claudia

A mis padres

ÍNDICE

Palabras clave	7
Resumen	7
Summary	7
Resumen extendido	9
1. Introducción, 11	
1.1. Objetivos del Trabajo y relación con el Plan de Estudios.....	11
1.2. Relación con las competencias asociadas al título.....	12
1.3. Relación con el futuro	14
1.4. Energías renovables	15
1.4.1. Energía eólica	17
2. Objetivo de este trabajo.....	21
2.1. Datos y Metodología	22
2.2. Resultados	23
2.2.1. Invierno (DEF).....	23
2.2.2. Primavera (MAM).....	25
2.2.3. Verano (JJA).....	28
2.2.4. Otoño (SON)	30
3. Aspectos computacionales del proyecto	35
3.1. Los lenguajes de programación empleados.....	35
3.2. Ficheros de código utilizados	38
3.1.1. MATLAB.....	36
3.1.2. R.....	38
4. Resumen y conclusiones	47
5. Agradecimientos.....	49
6. Bibliografía.....	51

Resumen

El presente trabajo aborda la problemática de la intermitencia en el suministro de energía eólica en la Península Ibérica, evaluando las posibilidades de estabilización mediante interconexiones entre distintas regiones, que se identifican mediante una técnica basada en la de Teleconexiones Empíricas Ortogonales. Ésta mejora a la de Componentes Principales empleada en otros estudios previos, en tanto en cuanto relaja la restricción de ortogonalidad espacial. Los resultados indican que los extremos nororiental y sur de la Península ofrecen las mejores perspectivas de interconexión, por sus potenciales eólicos elevados e incorrelacionados entre sí en las cuatro estaciones del año.

Summary

The present work addresses the problem of the intermittency in wind power generation in the Iberian Peninsula. The options for stabilization by interconnecting different areas are assessed by means of a technique based on Empirical Orthogonal Teleconnections. This method improves the Principal Component Analysis used in other studies insofar as the spatial orthogonality constraint is removed. Results show that the north-easternmost and southernmost parts of the Peninsula offer the best prospects for interconnection, on account of their wind potential, high and uncorrelated to each other year-round.

Palabras clave

Energía eólica, Variabilidad climática, Interconexión, Teleconexiones Empíricas Ortogonales

Resumen extendido

La energía eólica representa uno de los recursos renovables que más rápida y significativamente se están incorporando al “mix” energético europeo en los últimos años. A finales de 2014, podía cubrir un 10.2% de la demanda del continente, y las proyecciones más optimistas contemplan la posibilidad de que llegue a suponer cerca del 30% del suministro en las próximas décadas (EWEA, 2015). Este considerable potencial adolece, sin embargo, de una marcada intermitencia, en distintas escalas de tiempo (Kriescher y Schlosser, 2013; Jerez et al., 2013), que obliga a la provisión de recursos adicionales susceptibles de sustituir a los eólicos en sus períodos de baja producción. Esta intermitencia, en lo que concierne a los recursos disponibles en la Península Ibérica, constituye el objeto de estudio del presente proyecto, con dos líneas de trabajo específicas:

- 1.- Evaluar las opciones de interconexión entre distintas áreas peninsulares que permitiesen incrementar la continuidad del suministro energético de origen eólico.
- 2.- Examinar las principales estructuras de la variabilidad atmosférica de gran escala responsables de las fluctuaciones en los vientos ibéricos.

El análisis se ha centrado en los vientos sobre la Península Ibérica, contenidos en la base de datos del Climate Forecast System Reanalysis (CFSR; Saha et al, 2010), que cubren el período 1979-2010 con un intervalo de muestro de 6 horas y disponibles mediante registro y solicitud en <http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.1/>. De la misma fuente se han recabado datos de altura geopotencial destinados a la inspección de los vínculos entre los vientos peninsulares y las señales atmosféricas de gran escala.

La metodología aplicada consiste en una modificación de la técnica de Teleconexiones Empíricas Ortogonales (van den Dool et al., 2000), orientada a identificar las estructuras espaciales dentro de la Península Ibérica asociadas a una mayor disponibilidad de recursos eólicos. Para valorar esa disponibilidad, se considera la ocurrencia frecuente de vientos por encima de los umbrales conducentes a la generación de máxima potencia en modelos comunes de turbinas (Kriescher y Schlosser, 2013).

Los resultados obtenidos han sido empleados para evaluar las posibilidades de interconexión entre dichas estructuras y el potencial que ofrecen para mitigar la intermitencia en la generación de energía, así como para diagnosticar cuáles son los elementos atmosféricos de gran escala más influyentes en la variabilidad eólica en la Península en el registro bajo estudio.

1. Introducción

1.1. Objetivos del Trabajo y relación con el Plan de Estudios

La Normativa de Trabajos Fin de Grado de la Universidad de Alcalá en su punto 2.1, define el mismo como una asignatura que permitirá al alumno “mostrar de forma integrada los contenidos formativos recibidos y las competencias adquiridas asociadas al título de Grado”.

El Grado en Ingeniería en Electrónica y Automática Industrial consta de 240 créditos ECTS; 228 de otras asignaturas en las que he adquirido esos contenidos formativos y 12 dedicados al presente Trabajo

La temática elegida para este Trabajo de Fin de Grado permite mostrar la aplicación, en mayor o menor medida, de bastantes de esos contenidos formativos, como expondré a continuación.

El objetivo último de esta línea de investigación – de la cual este trabajo es sólo un primer eslabón – sería lograr una planificación eficiente de los servicios de generación de energía a partir de fuentes renovables.

Por lo tanto, este documento podría hacer las veces de estudio preliminar, destinado a otorgar un conocimiento más profundo del potencial energético de los vientos de la Península Ibérica, lo que permitiría diseñar la estrategia necesaria para poner en práctica una solución que supusiera un aprovechamiento óptimo de los mismos, teniendo en cuenta parámetros tanto económicos como medioambientales. Es decir, al hacer este trabajo, estamos sentando las bases para– en el caso de una hipotética ejecución práctica - aplicar la metodología de gestión estudiada en la asignatura de “Proyectos”, en la que seguramente habría que usar conocimientos adquiridos en “Economía de la Empresa”.

Para enfocar convenientemente este estudio, es más que recomendable conocer en qué consisten y cómo funcionan los aerogeneradores, algo que se logra gracias a la asignatura optativa de “Energías Renovables”, en la cual hay un tema exclusivamente dedicado al estudio de la Energía Eólica. No menos relevante es, para tener una visión más clara del papel actual de estas energías, conocer las industrias generadoras más utilizadas, incluyendo las tradicionales: este objetivo se logra gracias a “Centrales Eléctricas”.

Es precisamente en estas dos asignaturas en las que se imparten temas relativos al funcionamiento del sistema eléctrico español, incluyendo la generación, el transporte, la distribución, el consumo y la tarificación. No se olvidan tampoco los asuntos relacionados con el impacto medioambiental de todas estas actividades – no

olvidemos que es precisamente ese problema el que, en la etapa de generación, están llamadas a resolver las energías renovables.

Por supuesto, para afrontar con garantías los contenidos sobre energía eólica impartidos en la asignatura de “Energías Renovables”, debemos haber cursado previamente “Mecánica de Fluidos” y “Física I”, lo que nos ayudará a entender cómo actúa el viento y las posibilidades de obtener energía del mismo.

Centrándonos en la metodología empleada para el análisis de los datos, vemos que está basado en las habilidades adquiridas en dos cursos concretos: “Estadística”, donde se trata el análisis de datos y los parámetros y procedimientos que estamos utilizando en este estudio, así como significado y sus limitaciones, e “Informática”, que instruye en las habilidades que nos facilitan la implementación de los cálculos necesarios en nuestra investigación.

En las líneas precedentes, hemos analizado las relaciones directas – en mayor o menor medida – de este proyecto con las asignaturas del Grado. Sin embargo, no podemos olvidar que prácticamente cualquiera de las cursadas tiene contenidos aplicables de una forma más o menos evidente a la energía eólica, al control y gestión de la red eléctrica, al funcionamiento de los aerogeneradores y a la planificación de cualquiera de estos asuntos: “Ingeniería de Control I”, “Ingeniería de Control II”, “Resistencia de Materiales”, ... teniendo en cuenta que los principios básicos de esta industria han sido estudiados en otras como “Física I”, “Física II”, “Análisis de Circuitos”, “Máquinas Eléctricas”, “Electrónica de Potencia”, ...

1.2. Relación con las competencias asociadas al título

La Orden CIN/351/2009, de 9 de febrero, establece los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial. En su Apartado 3, enuncia sus objetivos; es decir, las competencias que deberán ser adquiridas por los estudiantes de dichas titulaciones.

Comienza mencionando las habilidades que deberán ser aportadas por los créditos de formación básica , entre los cuales destaca la *“Capacidad para la redacción, firma y desarrollo de proyectos en el ámbito de la Ingeniería Industrial que tengan por objeto, de acuerdo con los conocimientos adquiridos según lo establecido en el apartado 5 de esta orden, la construcción, reforma, reparación, conservación, demolición, fabricación, instalación, montaje o explotación de: estructuras, equipos mecánicos, instalaciones energéticas, instalaciones eléctricas y electrónicas, instalaciones y plantas industriales y procesos de fabricación y automatización.”*. No resulta excesivamente difícil relacionar el contenido de este Trabajo Fin de Grado con

la explotación (y como paso previo, con la instalación) de instalaciones eléctricas y energéticas.

Resulta evidente la relación de este Trabajo con el *“Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.”* En el presente documento, precisamente, se plasma el resultado de ese aprendizaje: el de un nuevo método de planificación de la explotación de la infraestructura eléctrica.

Por otro lado, se menciona el *“Conocimiento para la realización de mediciones, cálculos, valoraciones, tasaciones, peritaciones, estudios, informes, planes de labores y otros trabajos análogos”*. Estamos ante un estudio del potencial energético de un área determinada, y de su posible aprovechamiento para gestionar de forma más eficiente la energía obtenida.

El apartado 5 planifica las enseñanzas agrupando por bloques las competencias necesarias para graduarse en un título conducente a la profesión de Ingeniero Técnico Industrial. En primer lugar expone las de formación básica – es decir, las que deberá aportar cualquier grado de la Rama de Ingeniería y Arquitectura –, para pasar después a las comunes a la rama Industrial, dando paso por último a las de tecnología específica: las propias de cada especialidad dentro de nuestra profesión: Mecánica, Eléctrica, Química Industrial, Textil y Electrónica Industrial (la del Grado al que corresponde el presente Trabajo).

En el primer grupo de este epígrafe destaca la *“Capacidad para la resolución de los problemas matemáticos que puedan plantearse en la ingeniería. Aptitud para aplicar los conocimientos sobre: álgebra lineal; geometría; geometría diferencial; cálculo diferencial e integral; ecuaciones diferenciales y en derivadas parciales; métodos numéricos; algorítmica numérica; estadística y optimización.”* Como se puede apreciar, aquí nos estamos centrando en los conocimientos de estadística, enfocando su aplicación a la optimización de unas posibles interconexiones entre zonas geográficas separadas pero con potenciales eólicos complementarios.

Esos cálculos matemáticos, que implican el manejo de datos de gran volumen (no en vano trabajamos con un intervalo de algo más de 30 años), constituirían una labor hercúlea – y cuasi-eterna - de no ser por la Informática, gracias a la cual los cálculos apenas sí llevan unos segundos, permitiendo dedicar más tiempo a su análisis y formulación de hipótesis, verdadero objetivo de este trabajo. La Orden mencionada expresa los contenidos formativos relacionados con el tratamiento automático de la información como los *“Conocimientos básicos sobre el uso y programación de los ordenadores, sistemas operativos, bases de datos y programas informáticos con aplicación en ingeniería”*.

Si continuamos con las competencias comunes a la rama industrial, que son las que dotan de una personalidad propia a la profesión de Ingeniero Técnico Industrial, se habla de los *“Conocimientos básicos y aplicación de tecnologías medioambientales y sostenibilidad”*. Habida cuenta de las ventajas que para el medio ambiente representan las energías renovables, no parece demasiado aventurado considerar que esos saberes quedan, al menos en parte, aplicados en este documento. Todo ello sin olvidar que este tipo de fuentes energéticas han pasado a ser un icono del desarrollo sostenible a lo largo de las últimas décadas.

En el apartado anterior, hablando de las asignaturas cursadas he citado la de *“Proyectos”*, gracias a la cual aprendí las principales metodologías de planificación y gestión. Como no podía ser de otra manera, estas quedan englobadas en la competencia *“Conocimientos y capacidades para organizar y gestionar proyectos. Conocer la estructura organizativa y las funciones de una oficina de proyectos.”*, también reflejada por el legislador.

Por último, el texto legal analizado cita las competencias que debe tener cada uno de los grados para otorgar atribuciones en la especialidad correspondiente. Este documento y su presentación suponen el último acto de un grado de la especialidad de Electrónica Industrial. Por ello, en un principio nos fijaremos en las habilidades correspondientes a ella para destacar el *“Conocimiento aplicado de electrotecnia.”* y el *“Conocimiento y capacidad para el modelado y simulación de sistemas.”*. Al tiempo, podemos consultar las de la especialidad hermana (o madre) para encontrar el *“Conocimiento aplicado sobre energías renovables.”* Como la principal competencia tratada en este proyecto.

1.3. Relación con el futuro

En las líneas anteriores hemos hablado del Trabajo Fin de Grado y su relación con el pasado reciente del alumno: con los conocimientos y competencias adquiridos. Sin embargo, el Trabajo Fin de Grado puede ser visto también como una asignatura orientada al futuro: normalmente, su superación da lugar al título que, dará inicio o continuación a la carrera profesional del alumno.

De esta forma, hay que recordar la gran cantidad de profesionales de diversas formaciones que desarrollan su trabajo en el sector energético y, más concretamente, en el mundo de las renovables. Entre ellos, muchos Ingenieros Técnicos Industriales de prácticamente todas las especialidades.

Por otro lado, el sistema universitario ofrece a los alumnos graduados la posibilidad de seguir diversos estudios de postgrado: cursos, másteres,..., en algunos de los cuales se vuelven a tratar – entre otros - temas relacionados con la energía

eólica. En concreto, esos másteres pueden ser un primer paso para la realización de estudios de doctorado relacionados con la obtención y aprovechamiento de la energía.

Una opción menos habitual es la docencia en Enseñanza Secundaria (Enseñanza Secundaria Obligatoria, Bachillerato y Formación Profesional). En este caso, el currículo ofrece varias asignaturas en las que un alumno de este grado - previa realización de los estudios de postgrado correspondientes -, podrá ser profesor: Física, Física y Química, Matemáticas, Tecnología, Electrotecnia, las correspondientes a algunos ciclos formativos..., que, en mayor o menor medida, tienen relación con el tema que nos ocupa.

1.4. Energías renovables

La Real Academia Española, encargada de regular el uso del español, define la “energía” de la siguiente manera:

“Capacidad para realizar un trabajo. Se mide en julios. (Símb. E).”

Esta definición, a priori escueta, nos da una idea de la importancia y ubicuidad de la energía en nuestra vida diaria: está presente en cada una de las actividades que realizamos.

A lo largo de la Historia, ha sido uno de los “bienes” más preciados para el ser humano, lo que la ha convertido en protagonista de su supervivencia y su progreso tecnológico puesto que prácticamente cualquier actividad del hombre ha dependido, en mayor o menor medida, de ella: la obtención y preparación de alimentos, el transporte, la habitabilidad de los espacios,...

Esta necesidad de energía ha llevado, a lo largo de la Historia, a buscar nuevas fuentes que cumpliesen determinadas características, de modo que la obtención resultase lo menos costosa posible para el ser humano.

En primer lugar, como en la inmensa mayoría de los campos de la actividad del hombre, se ha buscado siempre recursos con el precio más bajo posible. Es obvio que la cantidad de dinero invertido en el total del proceso de explotación de instalación será menor si el precio de la materia prima es también inferior.

Por otro lado, que el recurso en cuestión permitiese el mayor rendimiento posible: es decir, que durante las operaciones de transformación, transporte y aplicación las pérdidas fuesen las mínimas imprescindibles, llegando en ocasiones a implementar soluciones – más o menos elaboradas – para recuperar las mismas empleándolas para ese mismo u otros usos.

Y en los últimos años, la mayor sensibilización con respecto al cuidado del medio ambiente ha hecho que a estos objetivos se les una el de encontrar recursos cuya extracción y aprovechamiento fuese lo más respetuoso posible con aquél.

Precisamente, son estos dos últimos requisitos los más llamativos - a la par que, seguramente, los más ventajosos - de la energía renovable, que se define – según, de nuevo, la Real Academia Española – como la:

“energía cuyas fuentes se presentan en la naturaleza de modo continuo y prácticamente inagotable, p. ej., la hidráulica, la solar o la eólica.”

Se trata de recursos, como la luz solar, el viento o la fuerza mareomotriz, que ni siquiera es necesario adquirir – un asunto distinto sería la carga impositiva que en cada territorio pueda gravar a este tipo de instalaciones: exponer esto y valorarlo daría seguramente para varios Trabajos Fin de Grado, e involucraría, además de a la Ingeniería, a otras disciplinas como el Derecho, la Economía o las Ciencias Políticas – y cuya recolección, en un principio, es la más respetuosa con el medio ambiente de las existentes.

De esto se extrae un nuevo beneficio, que sin duda se ha transformado en un factor importante a la hora de proyectar instalaciones de este tipo: la aceptación social. La percepción que la mayoría de las personas – posean o no formación técnica – tienen con respecto a las energías renovables es muy positiva, y bastante mejor que la de las tradicionales. No en vano, es frecuente leer en publicaciones de todo tipo cómo se habla de energías “limpias” para referirse a ellas.

No obstante, este tipo de explotaciones tiene también algunas desventajas, como podría ser su impacto visual – los aerogeneradores afectan negativamente a la estética del paraje en el que son instalados, al tiempo que pueden provocar efecto estroboscópico en un observador relativamente cercano -, o un posible daño a las aves – que ha dado lugar a que su instalación esté prohibida en determinadas zonas coincidentes con sus rutas más habituales, el ruido generado, sus costes y, especialmente, la impredecibilidad del recurso –algo, en general, propio no sólo del viento sino de la mayoría de las fuentes renovables de energía -, o su coste sin subvenciones ... (<http://www.energiasrenovablesinfo.com>)

Todos estos factores las convierten en un tema de plena actualidad, sobre el que no es infrecuente que se entablen debates tanto entre el público general como en el especializado. Como ejemplo más cercano, podríamos citar sin duda las regulaciones legales que han venido sufriendo en las últimas décadas, así como la consiguiente controversia sobre si estas normas resultan adecuadas y justas o si por el contrario favorecen más a un sector u otro (<http://www.energiaysociedad.es/ficha/3-5-regulacion-espanola-de-las-energias-renovables>).

De hecho, si nos centramos en el aspecto académico, es posible ver cómo en los últimos años los planes de estudio de diversas carreras técnicas han empezado a incluir asignaturas relativas a este tipo de aprovechamientos energéticos, llegando incluso a surgir titulaciones de máster centradas en ellos.

1.4.1. Energía eólica

Una vez hecha una pequeña introducción al mundo de las Energías Renovables, creemos que ha llegado el momento de centrarnos en la que tratamos en este Trabajo Fin de Grado: la eólica.

De una manera rápida y sencilla, podemos decir que la energía eólica es la obtenida a partir del viento. Mediante diversos procedimientos y mecanismos, el hombre transforma esa energía cinética en eléctrica.

El viento, tal y como sabemos, es un recurso inagotable y sin precio de adquisición – como ya hemos comentado anteriormente, habría que matizar este aspecto teniendo en cuenta las regulaciones legales de cada territorio sobre los diferentes medios de obtención de energía, que pueden hacer más o menos rentables unos métodos que otros. Esta gratuidad hace que prácticamente siempre haya estado presente en la actividad del ser humano.

Desde tiempos inmemoriales, la humanidad se ha servido del viento para facilitar la ejecución de las más variopintas tareas. En el imaginario colectivo persiste la estampa de los buques de vela que han transportado pasajeros y mercancías durante milenios, perdurando aún como artículo de lujo e incluso de formación naval. Menos conocidas, pero sin duda importantes, fueron algunas máquinas más sofisticadas como el órgano de oración descrito por Herón de Alejandría (Avia, 2012).

Sin embargo, el uso más conocido – y seguramente frecuente - del viento fue el que en diversas épocas y regiones del mundo han protagonizado los molinos que, movidos por ese elemento, se han encargado de facilitar al ser humano la molienda del grano. Llegados a este punto, y dado que estamos en un grado impartido en la Universidad de Alcalá, es casi obligatorio mencionar al más universal de los alcalaínos, que en su célebre obra *El Quijote* enfrenta a su singular protagonista con algunos de estos ingenios.

De hecho, no resulta infrecuente que el público no especializado siga denominando a los aerogeneradores como “molinos de viento”, tal vez recordando los tiempos – no tan lejanos, por otro lado – en los que las máquinas mencionadas más arriba eran las protagonistas de innumerables paisajes de la geografía patria. Curiosamente, parece que aquellos molinos de uso agrícola han dejado su lugar a los que hoy en día utilizamos para obtener energía eléctrica, como si estos fuesen los herederos de aquellos.

Como toda tecnología, la energía eólica ha ido evolucionando a lo largo del tiempo, dando lugar a instalaciones más seguras y eficientes, hasta el punto de llegar a convertirse en los que es hoy en día: una rama de la técnica que involucra a las más diversas áreas del saber humano: la Física, la Electricidad, la Mecánica, la Electrónica, la Informática,...

Por otro lado, cabe mencionar que los aerogeneradores aislados de los inicios de esta industria han ido dando lugar, con el paso del tiempo, a su agrupamiento en grandes parques eólicos, y destacar que, en los últimos años, existe una cierta tendencia a ubicarlos en el mar, alejados a ser posible de las costas.

La energía eólica representa uno de los recursos renovables que más rápida y significativamente se están incorporando al “mix” energético europeo en los últimos años. A finales de 2014, podía cubrir un 10.2% de la demanda del continente, y las proyecciones más optimistas contemplan la posibilidad de que llegue a suponer cerca del 30% del suministro en las próximas décadas (EWEA, 2015). Centrándonos en nuestro país, dentro de las renovables la eólica tiene un papel muy notorio en relación con el total de energía procedente de fuentes renovables, como podemos apreciar en la siguiente gráfica:

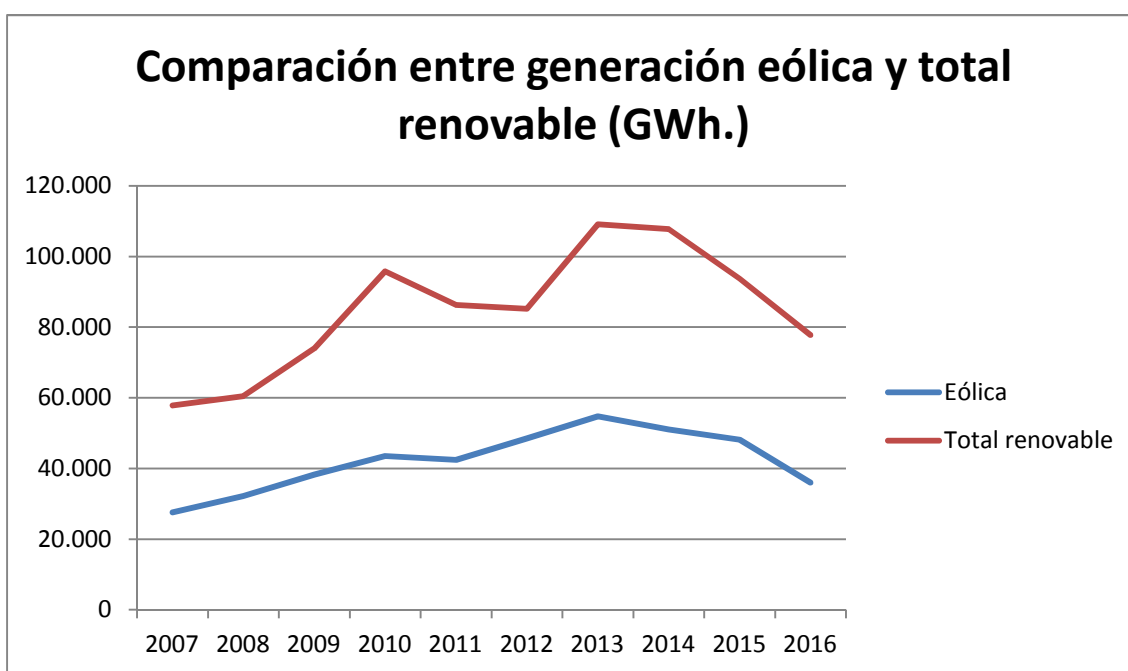


Figura 1. Comparación entre las energías procedentes de la generación eólica y del total de fuentes renovables.
Fuente: www.ree.es (datos actualizados el 12 de septiembre de 2016).

Si comparamos la generación de energía eléctrica proveniente de fuentes eólicas con la total – renovable y convencional – vemos que, aunque como es lógico, en un porcentaje menor, sigue representando una aportación a tener en cuenta: todo esto es fácilmente observable en la figura 2. Por ello, y a pesar de algunos de los

inconvenientes explicados anteriormente, creemos que es muy recomendable apostar por su uso y evolución sin olvidar los de las otras tecnologías.

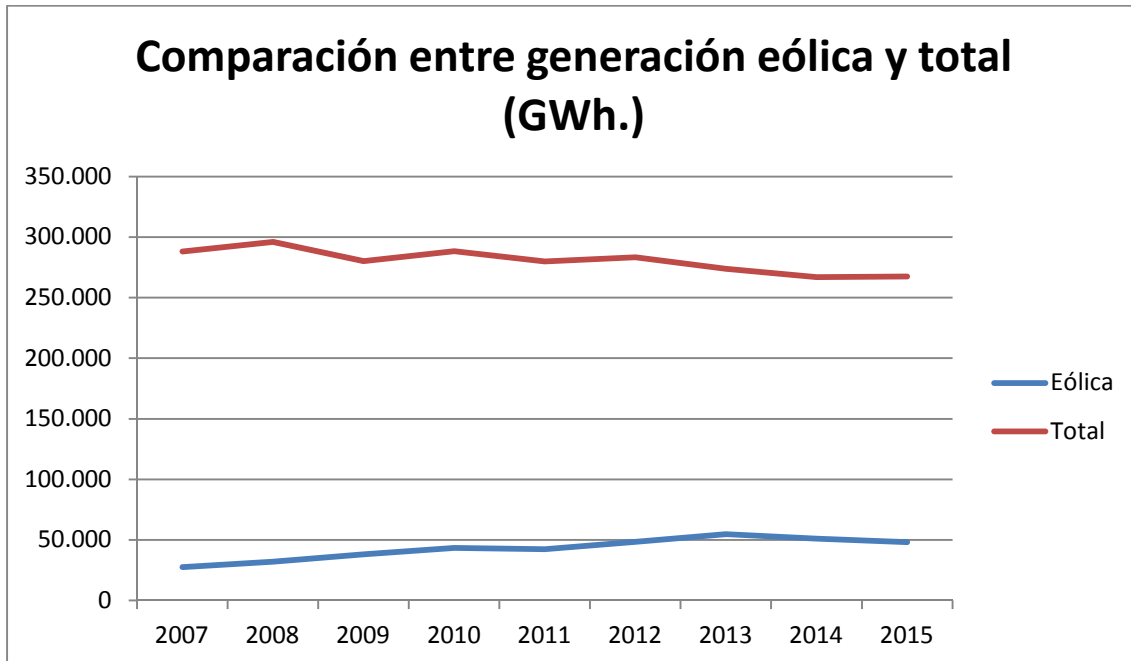


Figura 2. Comparación entre las energías procedentes de la generación eólica y del total de fuentes renovables.
Fuente: www.ree.es (datos actualizados el 12 de septiembre de 2016).

Cabe destacar, por otro lado, que la potencia eólica instalada ocupa una posición de cierto peso si la comparamos con la total – renovable y convencional – que podemos encontrar en nuestro país. En la siguiente figura podemos ver su evolución en los últimos años:

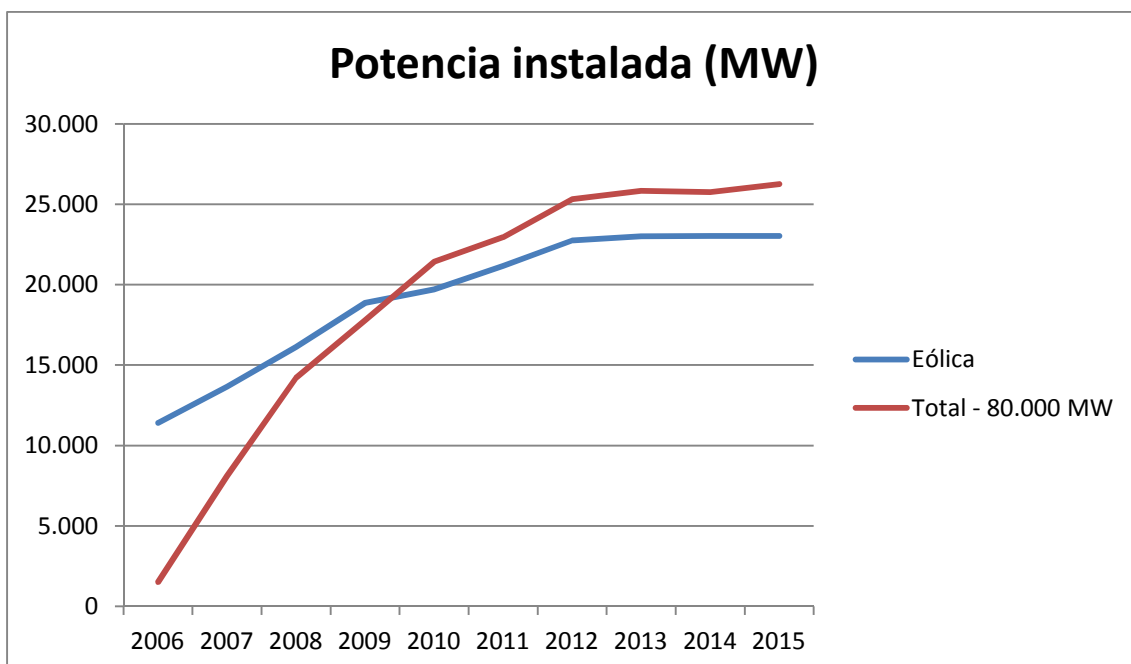


Figura 3. Comparación entre las potencias instaladas eólica y total (restándole 80.000 MW a ésta). Fuente: www.ree.es (datos actualizados el 12 de septiembre de 2016).

Así, podemos observar su implantación ha ido aumentando en un porcentaje mayor que el de la potencia total instalada, constatando su peso cada vez más importante en la industria energética española.

De los datos numéricos, podemos resaltar que el 21'67 % de la potencia total instalada corresponde a energía eólica, lo que da una idea de la importancia en el “mix” energético, al menos a nivel nacional.

La notoriedad que ha adquirido en las últimas décadas, unida a sus múltiples ventajas – la mayoría ya citadas en las líneas anteriores – y a las prometedoras perspectivas de futuro que estas tecnologías tienen, son las que nos han animado para iniciar este Trabajo y motivado para llevarlo a término.

Una vez descrito de forma general el marco actual de la energía eólica, en el siguiente apartado plantearemos el tema concreto en el que hemos trabajado, explicando la metodología que hemos aplicado y los resultados a que ha conducido.

2. Objetivo de este trabajo

Una de las dificultades de mayor calado que pesan sobre la utilización de energía eólica radica en la variabilidad e incertidumbre de su suministro, que no sólo ocasionan períodos de carencia del mismo, sino también, en virtud de la combinación de la curva típica de potencia de las turbinas convencionales con las rápidas fluctuaciones en la intensidad del viento, súbitos ascensos o rampas cuya integración en el sistema eléctrico plantea retos notables. Adicionalmente, la inestabilidad del recurso exige mantener fuentes supletorias que se encuentran sujetas a un régimen de funcionamiento que reduce su eficiencia, impidiendo que el empleo de la producción eólica redunde en la máxima disminución de emisiones de CO_2 posible (Gutiérrez-Martín et al, 2013).

La problemática descrita ha suscitado en los últimos años numerosos estudios destinados a evaluar las posibilidades existentes para la estabilización del suministro energético a partir de los vientos. La mera proliferación de parques eólicos y consecuente expansión geográfica muestra una suavización de las fluctuaciones a escala nacional y continental (Buttler et al, 2016; Kriescher y Schlosser, 2013), dada la pequeña distancia de decorrelación que exhiben las fluctuaciones eólicas. Modos de explotar este factor para la mejorar la fiabilidad de la generación por vía eólica han sido investigados por diversos autores, entre ellos Santos-Alamillo et al (2014), que examinan mediante una técnica de Análisis en Componentes Principales las opciones de interconexión entre distintas zonas del sur de la Península Ibérica. Otras alternativas de estabilización contempladas incluyen otras fuentes renovables, como la fotovoltaica (Santos-Alamillo et al, 2012; Buttler et al, 2014), la mareomotriz y la undimotriz (Astáriz e Iglesias, 2016; Lund, 2006).

Cualquiera que sea la alternativa adoptada para la mitigación de la irregularidad de la producción eólica, su planteamiento se beneficiará, si no lo requiere ineludiblemente, de una mejor comprensión de los mecanismos de gran escala que gobiernan la variabilidad de la intensidad del viento en las áreas de interés. Se han documentado ya los efectos de la Oscilación del Atlántico Norte sobre el suministro tanto de parques eólicos individuales (Brayshaw et al, 2011) como del conjunto de instalaciones en la Unión Europea (Kriescher y Schlosser, 2013).

El presente trabajo propone una técnica novedosa para el examen de las posibilidades de interconexión de los recursos eólicos en una determinada área, aplicándola al caso de la Península Ibérica (junto con porciones del norte de África y las Islas Baleares). La siguiente sección describe los datos empleados y la metodología aplicada, para pasar a continuación a exponer los resultados obtenidos. Éstos se resumen y discuten en la última sección.

2.1. Datos y Metodología

Los datos utilizados en este estudio proceden de los reanálisis del Climate Forecast System Reanalysis (CFSR; Saha et al, 2010), que cubren el período 1979-2010 con un intervalo de muestreo de 6 h. y se encuentran disponibles mediante registro y solicitud en el sitio <http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.1/>. Datos procedentes de reanálisis han sido empleados en investigaciones anteriores sobre recursos eólicos, con buenos resultados (Cannon et al, 2015). Los datos están distribuidos en una rejilla de puntos espaciados 0.5° tanto en longitud como en latitud. Se han tomado las velocidades de oeste a este, en adelante zonal, y de sur a norte, en lo sucesivo meridional, sobre los puntos de malla dentro del dominio de la Península Ibérica, obteniendo a partir de ellos la intensidad del viento en cada localización. Se han considerado asimismo datos de altura geopotencial a 1000 hPa (Z1000) y a 500 hPa (Z500) en un dominio más amplio, que se extiende por el Atlántico Norte y Europa Occidental (120°O - 120°E , 20°N - 90°N). Para estas variables se ha utilizado la media diaria computada a partir de los valores cada 6 h. Todos los datos se han segregado por estaciones, estableciendo la de invierno de Diciembre a Febrero (DEF), la de primavera de Marzo a Mayo (MAM), la de verano de Junio a Agosto (JJA), y la de otoño de Septiembre a Octubre (SON).

Se ha determinado en primer lugar la frecuencia de superación del umbral de intensidad del viento de 10 m/s en cada punto de la malla del dominio peninsular. La elección de dicho límite obedece a la forma que adopta la curva de potencia generada por las turbinas eólicas convencionales, que se estabiliza en un suministro máximo en el entorno de aquel valor. Las ubicaciones donde habitualmente se supera ese umbral constituyen por tanto áreas con un potencial eólico destacado dentro de la región bajo estudio. El procedimiento seguido a continuación corresponde esencialmente al del análisis de Teleconexiones Empíricas Ortogonales de Van den Dool et al. (2000), con la salvedad de que las series temporales que definen los modos construidos por el método no son las que dentro de las de cada punto en el dominio explican consecutivamente la mayor varianza del campo en él, sino que se toman de las localizaciones con más ocurrencias de intensidades de viento superiores al umbral establecido. Así, se comienza por adoptar la serie temporal en el punto de máxima frecuencia de superación como Componente 1 y se obtiene su mapa de correlación con el resto de intensidades del viento en el dominio peninsular, así como los de regresión con Z1000 y Z500 en el área más amplia del Atlántico Norte y Europa Occidental. En el cálculo de estas correlaciones y regresiones se emplean valores diarios de los que se ha retirado la media del período 1979-2010. Seguidamente se retira de la serie de anomalías de intensidad de viento diaria en cada localización la regresión sobre la Componente 1, y se busca el punto siguiente en frecuencia de superación del umbral que reúna estos requisitos: se encuentra por encima del percentil 95% en ocurrencia de vientos por encima del umbral de 10 m/s, y permanece

en él más de un 50% de varianza por explicar tras retirar de él la regresión sobre la (o, en sucesivas iteraciones, las) Componente (Componentes) previa (previas). Se procede así para evitar redundancias y modos de muy baja varianza. Esta secuencia conduce a la obtención de un conjunto de modos ortogonales (en cuanto que carentes de correlación temporal) vinculados a las áreas de mayor potencial eólico del dominio.

2.2. Resultados

Se detallan seguidamente los resultados obtenidos en el análisis para cada estación. En la figura 8 se representa el estado medio de Z1000 en cada una de ellas, como referencia para la interpretación de los mapas de regresión incluidos más adelante. En dicha figura se aprecia la exposición de la Península al Anticiclón de las Azores durante todo el año, pero más notablemente en primavera y verano, con la migración del mismo hacia el Polo.

2.2.1. Invierno (DEF)

Con los criterios indicados en la sección previa, el análisis para la estación de invierno arroja 6 modos, que explican en conjunto un 39.7% de la varianza del campo de intensidad diaria del viento en la Península Ibérica. En la tabla 1 se detallan las ubicaciones de los puntos correspondientes y la varianza atribuida a cada modo individual (nótese que los modos no están numerados conforme a la varianza explicada, sino según orden decreciente en la frecuencia de superación de la mediana de intensidad del viento en el dominio). La figura 1 muestra, en su columna de la izquierda, el mapa de correlación de la intensidad diaria del viento en cada punto del dominio con la componente temporal (esto es, la serie de intensidad en el punto base) de cada modo; las columnas central y derecha contienen los mapas de regresión de Z1000 y Z500.

	Modo DEF1	Modo DEF2	Modo DEF3	Modo DEF4	Modo DEF5	Modo DEF6
Punto base	3°E 43°N	3°E 39.5°N	6°O 36.5°N	7°O 43.5°N	1.5°O 40.5°N	9°O 39.5°N
Varianza exp. (%)	6.5	10.3	4.8	9.3	6.5	2.3

Tabla 1. Puntos base y varianza explicada para los modos de la estación DEF.

El Modo DEF1 (Diciembre, Enero y Febrero), que corresponde al 6.5% de varianza explicada se encuentra asociado fundamentalmente a las fluctuaciones en intensidad del viento en la zona nororiental de la Península Ibérica, particularmente en el extremo noreste y en el Valle del Ebro, donde explica una fracción sustancial de una variabilidad ligada esencialmente a cambios en la componente meridional del viento, a tenor de la estructura hallada en los mapas de regresión de Z1000 y Z500. En ellos se

observa, con el signo elegido para la representación, un fuerte gradiente este-oeste sobre la región oriental de la Península, que supondría modificaciones en la componente norte de la velocidad del viento.

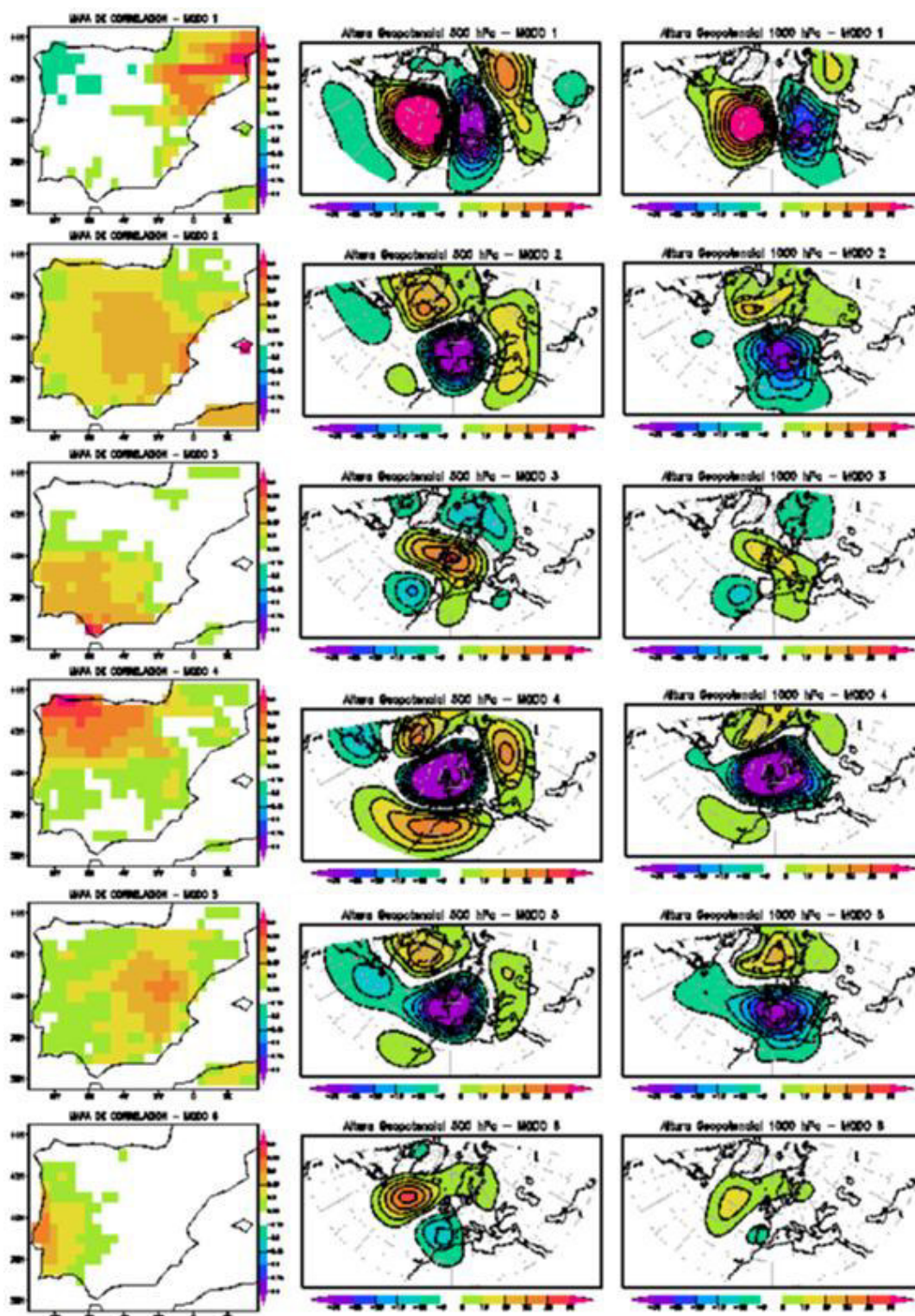


Figura 4. Mapas de correlación con intensidad del viento en la Península Ibérica (izquierda), Z500 (centro) y Z1000 (derecha) para los modos 1 a 6 para la estación de invierno (DEF).

El Modo DEF2 da cuenta de una varianza del 10% del total del dominio, debido a fracciones locales superiores o próximas a esa cifra en la mayor parte del mismo, aun superando el 36% solamente en unos pocos puntos de la Península. El punto central del modo se ubica sobre las Islas Baleares, donde es responsable de la mayor parte de la varianza. La estructura atmosférica asociada está constituida por un núcleo de presiones centrado al noreste de la Península Ibérica, con su flanco suroriental sobre las Islas Baleares.

El Modo DEF3, con una varianza total de 4.8%, tiene importancia en el cuadrante suroccidental de la Península, y explica la mayor parte de los puntos del extremo sur. La configuración atmosférica del modo exhibe un núcleo de presiones al suroeste de la Península, que sugiere una posible asociación con la entrada de depresiones de origen atlántico, junto a otro de signo opuesto al noroeste.

Al Modo DEF4 le corresponde un 9.3% de la varianza total, fundamentalmente debido a que contiene buena parte de la variabilidad del sector noroccidental de la Península, en el que rebasa el 36% de varianza local. El punto central está en el Cantábrico y las fluctuaciones de intensidad del viento parecen achacables a la componente zonal, dado el fuerte gradiente meridional que sobre la región presentan los mapas de regresión de Z1000 y Z500.

El Modo DEF5 explica globalmente un 6.5% de varianza, sin superar en ningún punto del dominio una fracción del 60% de la varianza local. El máximo se presenta en el área del Sistema Ibérico, asociado a fluctuaciones de componente noroeste en los vientos ocasionadas por un núcleo de presiones centrado sobre el sur de Francia.

El Modo DEF6 da cuenta de una fracción pequeña de la varianza del campo de intensidad del viento en el dominio analizado, un 2.8%, ya que la región donde cobra alguna importancia está restringida al sur de Portugal. Los máximos de varianza local explicada no alcanzan el 60% y se ubican junto a la costa portuguesa entre 39°N y 40°N. El mapa de regresión de Z1000 presenta un núcleo comparativamente débil que se extiende sobre la mitad occidental de la Península.

2.2.2. Primavera (MAM)

El análisis extrae en primavera un conjunto de 7 modos que retienen un 32.7% de la varianza total del campo de intensidad media diaria del viento en el dominio estudiado. Los puntos base y varianza explicada de esos modos se dan en la tabla 2.

Los modos MAM1, MAM2, MAM4, MAM6 y MAM7 (Marzo, Abril y Mayo) tienen correspondencia con algunos de los hallados en la estación de invierno. Así, MAM1 es análogo a DEF1, y refleja fluctuaciones de intensidad del viento en el noreste

de la Península, asociadas a un gradiente zonal de presiones sobre la región. MAM2 equivale a DEF3, si bien explica una menor varianza global y se encuentra más centrado en el punto base del extremo sur de la Península; la estructura atmosférica no muestra en Z1000, ni en Z500, el mismo núcleo al suroeste, lo que induce a pensar en un fenómeno más local vinculado a la canalización de los vientos en el Estrecho de Gibraltar. MAM4 se asemeja a DEF2, aunque con una varianza explicada mucho menor, debido a su confinamiento a las Islas Baleares. MAM6 es similar a DEF6, aunque con una mayor presencia en el dominio, y con una estructura atmosférica algo diferente. Finalmente, MAM7 y DEF4 son coincidentes en su representación de fluctuaciones de viento en el noroeste peninsular y en la configuración atmosférica asociada, menos intensa en MAM que en DEF.

	Modo MAM1	Modo MAM2	Modo MAM3	Modo MAM4	Modo MAM5	Modo MAM6	Modo MAM7
Punto base	3°E 43°N	6°O 36.5°N	1°E 36.5°N	3°E 39.5°N	6.5°O 37°N	9°O 39.5°N	7°O 43.5°N
Varianza exp. (%)	6.2	3.5	5.2	3.3	6.0	3.2	5.3

Tabla 2. Puntos base y varianza explicada para los modos de la estación MAM.

El modo MAM3, con una varianza del 6% y sin un análogo directo en DEF, tiene su punto base en la zona del norte de África incluida en la región en estudio, y cobra alguna importancia en el sureste peninsular. La distribución de anomalías en Z1000 y Z500 posee un parecido notable con DEF2 y MAM4.

El modo MAM5 supera el 9% de varianza local explicada en gran parte de la Península, lo que conduce a una varianza global explicada del 6% a pesar de no rebasar el valor del 60% en su punto base, ubicado en el suroeste de la Península. Está asociado a un núcleo de presiones con centro en el entorno del Canal de la Mancha.

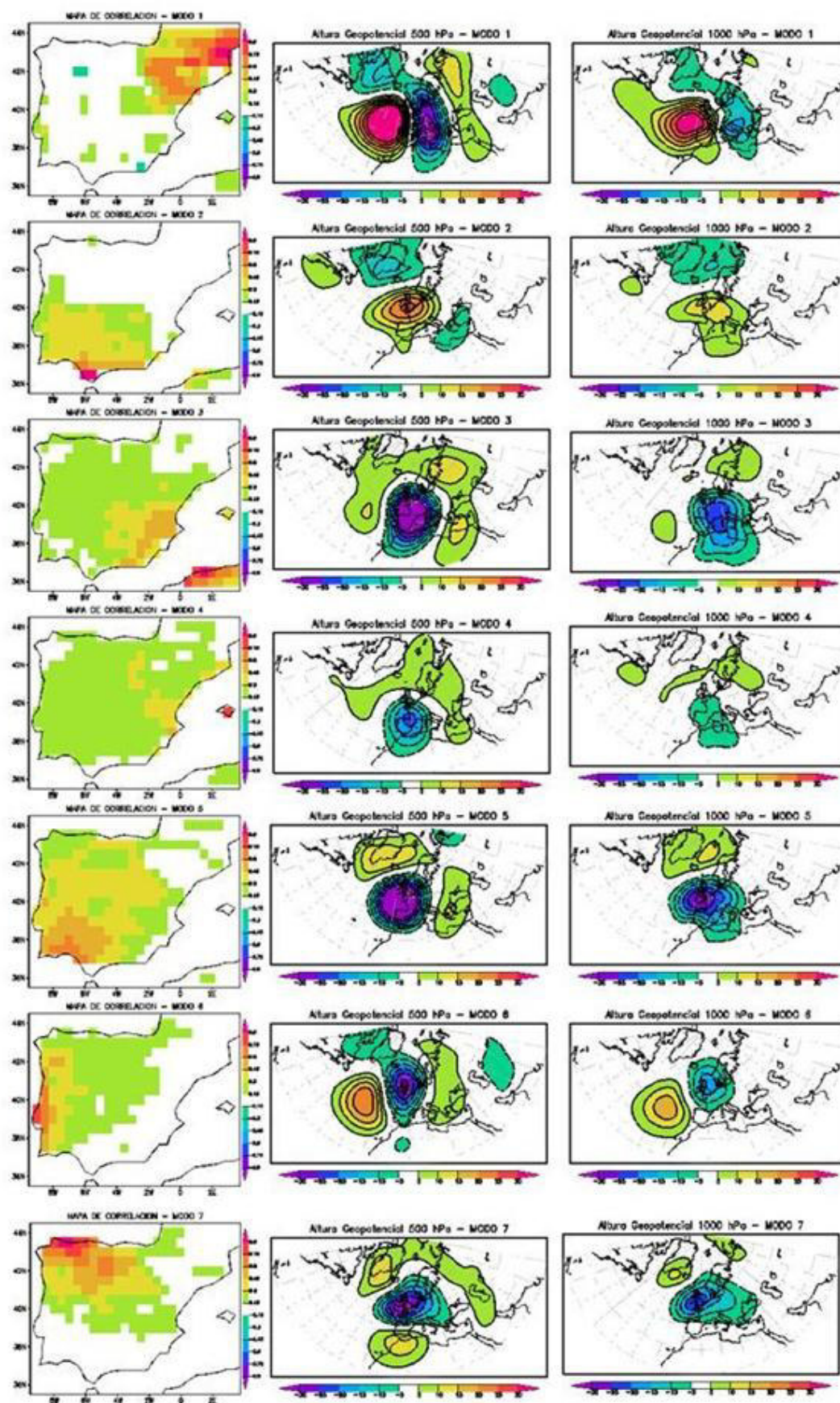


Figura 5. Mapas de correlación con intensidad del viento en la Península Ibérica (izquierda), Z500 (centro) y Z1000 (derecha) para los modos 1 a 7 para la estación de primavera (MAM).

2.2.3. Verano (JJA)

Los resultados del análisis para la estación de verano registran, siempre con las condiciones establecidas antes, 7 modos que contienen un 23.8% de la varianza total del campo explicado. La tabla 3 resume los datos de puntos base y varianza explicada correspondientes.

	Modo JJA1	Modo JJA2	Modo JJA3	Modo JJA4	Modo JJA5	Modo JJA6	Modo JJA7
Punto base	3°E 43°N	6°O 36.5°N	1°O 42°N	1°E 36.5°N	9°O 39.5°N	4°O 42.5°N	6.5°O 37°N
Varianza exp. (%)	5.1	1.5	3.9	1.4	2.0	7.1	2.8

Tabla 3. Puntos base y varianza explicada para los modos de la estación JJA.

Existen de nuevo coincidencias con modos determinados en las estaciones consideradas previamente. El Modo JJA1 (Junio, Julio y Agosto) corresponde una vez más, como DEF1 y MAM1, a variaciones de intensidad del viento en el noroeste de la Península Ibérica, con la misma estructura atmosférica que en aquellos casos. Asimismo, el Modo JJA2 comparte el punto base en el extremo sur de la Península con DEF3 y MAM2. También encuentra paralelo en DEF y en MAM (DEF6 y MAM6, respectivamente) el Modo JJA5, representativo de variaciones en la intensidad del viento en la franja más occidental de la Península. Los Modos JJA4 y JJA7 tienen analogía con modos en MAM y carecen de ella en DEF. JJA4 tiene, como MAM3, su punto base en la parte norteafricana del dominio, mientras que JJA7 afecta, como MAM5, al suroeste peninsular. El modo JJA3 es exclusivo de esta estación estival y explica variaciones en el Valle del Ebro, donde se solapa con el modo JJA1 (recordemos que los modos son ortogonales en el tiempo, por construcción, pero no en el espacio). El Modo JJA6, también exclusivo del verano, ocupa el área noroccidental de la Península, con una distribución parcialmente coincidente con los modos DEF4 y MAM7, pero con su punto base desplazado hacia el este, en el centro-norte de la Península.

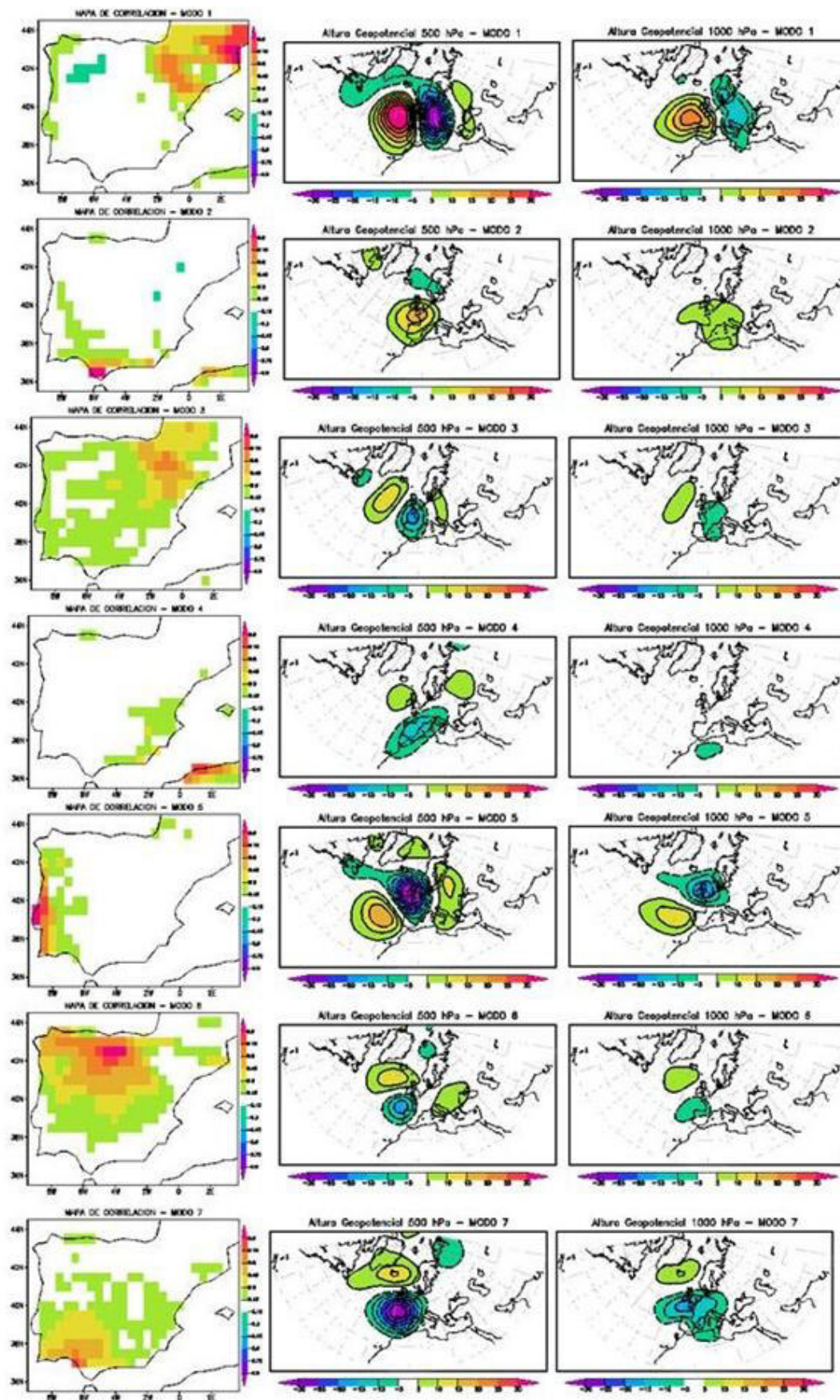


Figura 6. Mapas de correlación con intensidad del viento en la Península Ibérica (izquierda), Z500 (centro) y Z1000 (derecha) para los modos 1 a 7 para la estación de verano (JJA).

2.2.4. Otoño (SON)

En la estación de otoño (SON, Septiembre, Octubre y Noviembre), 6 son los modos resultantes del análisis efectuado. En conjunto explican un 31.8% de la varianza. Sus puntos base y varianzas explicadas individualmente se han consignado en la tabla 4.

	Modo SON1	Modo SON2	Modo SON3	Modo SON4	Modo SON5	Modo SON6
Punto base	3°E 43°N	3°E 39.5°N	6°O 36.5°N	7°O 43.5°N	1°E 36.5°N	6.5°O 37°N
Varianza exp. (%)	5.3	8.3	2.7	9.1	1.6	4.8

Tabla 4. Puntos base y varianza explicada para los modos de la estación SON.

Los cuatro primeros tienen sus análogos en los que aparecen en el mismo orden en la estación DEF. El Modo SON1 cubre el noroeste de la Península y está relacionado con contrastes zonales de presión sobre la región. El Modo SON2 se define a partir del punto base en las Islas Baleares, donde explica prácticamente toda la varianza local, y supera el 9% de la misma en buena parte de la Península, con mayor peso en el sureste; la configuración atmosférica incluye un núcleo centrado sobre el sur de Francia, flanqueado a este y oeste por otros dos más débiles de signo contrario. El Modo SON3 corresponde al punto base en el extremo sur de la Península, junto al Estrecho de Gibraltar; en la estructura atmosférica asociada se observa un núcleo centrado sobre el Canal de la Mancha, que extiende su influencia hacia el sur por el Mediterráneo occidental. El Modo SON4 recoge las fluctuaciones de intensidad del viento en el área noroccidental de la Península, con punto base en el Cantábrico occidental y una disposición de isohipsas que recorren la Península en dirección zonal, con un marcado gradiente meridional, ligadas a un foco situado sobre las Islas Británicas.

Los dos modos restantes, SON5 y SON6, tienen correspondencia con otros de primavera y verano. El Modo SON5 mantiene la configuración que comparten MAM3 y de JJA4, con punto base en la zona del norte de África incluida en el estudio, y con una ligera influencia sobre el sureste peninsular. El Modo SON6, como MAM5 y JJA7, explica una parte apreciable de la varianza, sin rebasar el 60%, en la región suroccidental de la Península.

Recopilando los resultados desde una perspectiva anual, hay dos modos que el análisis realizado registra en todas las estaciones. El primero de ellos es el correspondiente a DEF1-MAM1-JJA1-SON1, que explica varianzas de entre el 5.1% (en

verano) al 6.5% (en invierno). Su punto base se localiza en el extremo nororiental de la Península, y la estructura atmosférica asociada, muy estable en todas las estaciones, revela que las fluctuaciones en intensidad del viento proceden de variaciones en la componente meridional inducidas por un pronunciado gradiente zonal de presiones entre dos núcleos de signos opuestos respectivamente al oeste y el este de la parte oriental de la Península Ibérica. El segundo modo apreciable en todas las estaciones es el constituido por DEF3-MAM2-JJA2-SON3, cuyo punto base se sitúa en el extremo sur de la Península. La varianza del campo explicada por este modo varía del 1.5% en verano, cuando su influencia está más limitada a la vecindad del punto base, al 4.8% en invierno, cuando se extiende por la parte suroccidental de la Península. La configuración atmosférica que acompaña a este modo no exhibe fuertes gradientes de presión en el entorno del punto base, lo que, unido a la limitada extensión espacial que muestra y a la proximidad al Estrecho de Gibraltar, las variaciones de intensidad del viento en este caso se rigen por las peculiaridades locales del área.

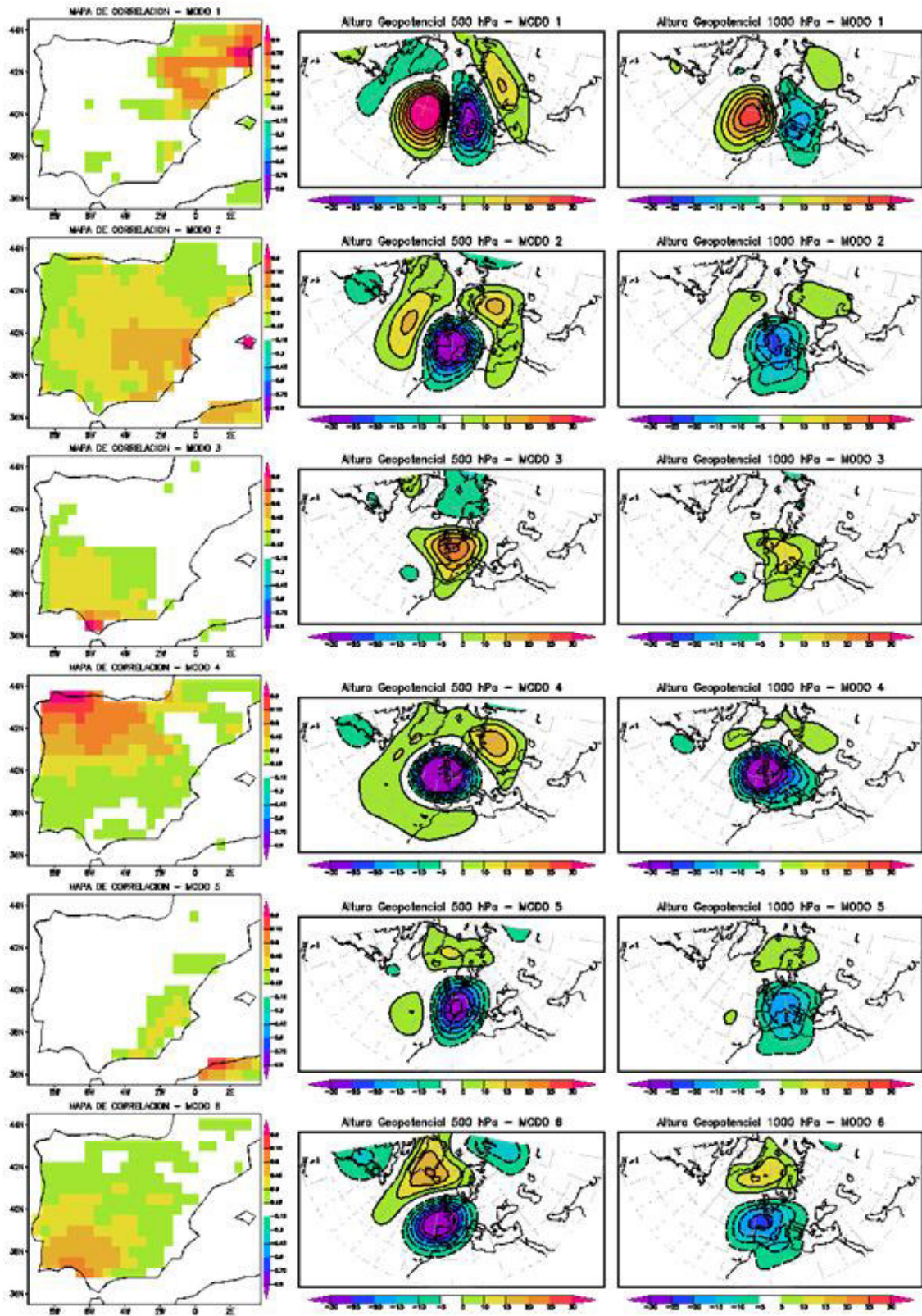
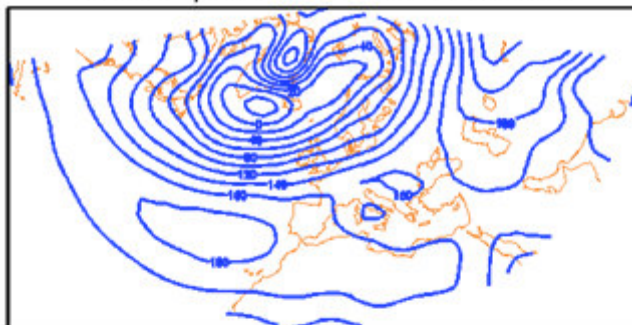


Figura 7. Mapas de correlación con intensidad del viento en la Península Ibérica (izquierda), Z500 (centro) y Z1000 (derecha) para los modos 1 a 7 para la estación de otoño (SON).

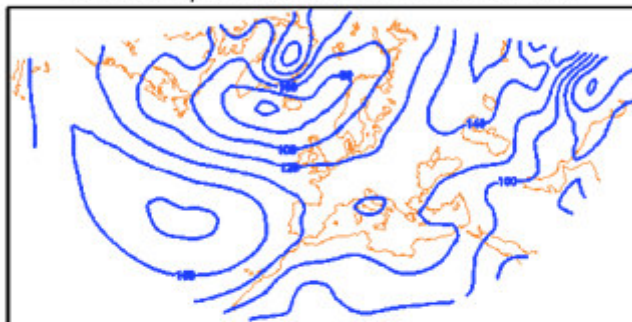
Otros cuatro modos se encuentran ausentes en una sola estación, y se manifiestan en las demás. Los modos SON4-DEF4-MAM7 conforman un modo de otoño a primavera, con varianzas explicadas de 9.1%-9.3%-5.3%, que refleja fluctuaciones de la intensidad del viento en la región noroccidental de la Península Ibérica. El punto base se ubica en el Cantábrico occidental y se aprecia que es la componente zonal del viento la causante de las variaciones de intensidad, dada la distribución de isohipsas sobre el área, orientadas de oeste a este, con un marcado gradiente meridional. También aparece de otoño a primavera el modo compuesto por SON2-DEF2-MAM4, con punto base en las Islas Baleares, más extendido por el resto del dominio en invierno y otoño (varianzas explicadas 10.3%-8.3%-3.3%). De invierno a verano está vigente el modo correspondiente a DEF6-MAM6-JJA5, con varianzas explicadas relativamente bajas en el dominio (2.3%-3.2%-2%), al encontrarse confinada su influencia a una estrecha franja junto a la costa de Portugal, con punto base en la latitud del Cabo de la Roca. Entre primavera y otoño son dos las agrupaciones de modos que aparecen. Una de ellas, MAM3-JJA4-SON5 presenta su punto base en la zona de la costa norteafricana retenida en el área bajo estudio, y ejerce alguna influencia sobre el sureste de la Península Ibérica. La otra es MAM5-JJA7-SON6, con punto base en la costa suroccidental de la Península, si bien la varianza explicada incluso en él es comparativamente baja.

Existen, finalmente, tres modos exclusivos de una estación. DEF5, con peso mayor en la región del Sistema Ibérico y una configuración atmosférica de isohipsas orientadas de noroeste a sureste, aparece solamente en invierno. JJA3 explica parte de la varianza estival en el Valle del Ebro, mientras que JJA6 es relevante en verano en la zona noroccidental de la Península, con punto base en el centro-norte de la misma.

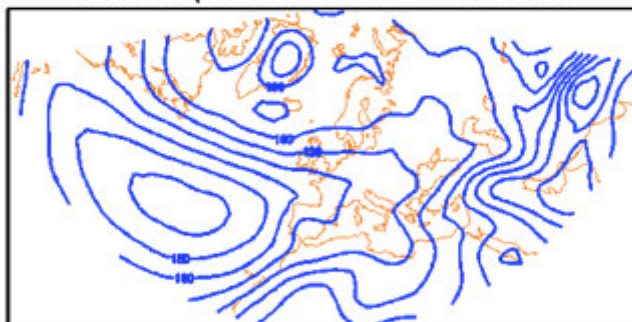
Altura Geopotencial 1000 hPa – Media DJF



Altura Geopotencial 1000 hPa – Media MAM



Altura Geopotencial 1000 hPa – Media JJA



Altura Geopotencial 1000 hPa – Media SON

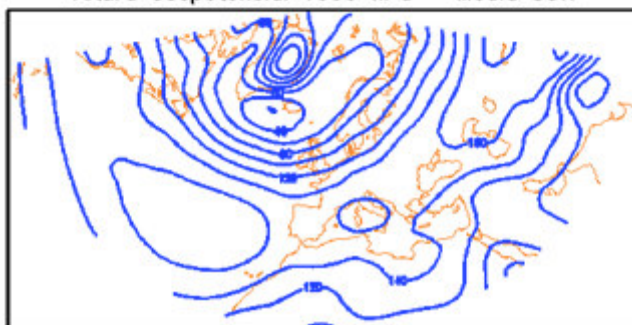


Figura 8. Valor medio de Z1000 para las distintas estaciones.

3. Aspectos computacionales del proyecto

3.1. Los lenguajes de programación empleados

Encontrándonos en la tesitura de resolver un problema que incluye gran cantidad de cálculos técnicos, manejando un volumen importante de datos, parece lo más indicado usar una solución informática que permita emplear el menor tiempo y esfuerzo posible en obtener el resultado deseado.

Dada la especificidad del problema a resolver, no existe – o al menos no tenemos noticia –ninguna herramienta diseñada *ad hoc* para el mismo. Por ello, nos hemos visto obligados a desarrollar una propia: un hecho que se ve reflejado en la propia denominación del Trabajo.

Llegados a este punto, nos encontramos ante un pequeño dilema, de cuya resolución puede derivarse el hecho de que el Trabajo revista mayor o menor complejidad: ¿qué lenguaje de programación utilizar? En plena Era de la Información, son muchas las opciones que se abren ante nosotros: lenguajes estructurados, orientados a objetos, lógicos, funcionales, de propósito general, de cálculo científico, compilado, interpretado, software libre, de pago, ...

Ya hemos comentado en varias ocasiones que nos enfrentamos a cálculos científicos y, fundamentalmente, estadísticos. Por ello, de entre todas las alternativas seleccionamos las más apropiadas para estas circunstancias.

La primera opción valorada es el lenguaje R: enfocado principalmente a la Estadística, desde su desarrollo inicial en 1993, la comunidad científica ha confiado en él para aplicaciones en campos tan dispares como la Minería de Datos, la Bioinformática, la Biomedicina o las Matemáticas Financieras. De hecho, se trata de una evolución del lenguaje S, herramienta que comenzó a prestar su servicio a los científicos en 1970, demostrando así ser una solución más que fiable.

Otra posibilidad es M. Este lenguaje forma parte de MATLAB: más que un lenguaje, se trata de una herramienta conocida de sobra por los estudiantes de Ciencias e Ingenierías de casi cualquier parte del mundo. En nuestro caso concreto, es utilizado para cálculos de asignaturas relacionadas con la Automática como “Ingeniería de Control I”, “Ingeniería de Control II” e “Ingeniería de Control Electrónico”, mecánicas como “Resistencia de Materiales” o electrónicas como “Electrónica de Potencia”. Por ello, podríamos definirlo sin exagerar como un compañero de viaje durante los años que duran nuestros estudios, cuyo conocimiento hace que lo tengamos en cuenta en ocasiones a la hora de resolver operaciones matemáticas de otras asignaturas, e incluso considerarlo para implementar soluciones más allá del momento de la graduación.

Estos factores nos han hecho decantarnos por ambos lenguajes para desarrollar las operaciones matemáticas de nuestro proyecto, puesto que creemos que cada uno de ellos es el más adecuado para unas tareas concretas, como veremos más adelante

Sin embargo, podemos decir que, en rasgos generales, la elección de MATLAB queda justificada precisamente por este conocimiento previo sobre MATLAB, unido a la seguridad de que con este lenguaje seríamos capaces de conseguir los resultados requeridos.

Y del mismo modo, la versatilidad y orientación clara a los cálculos estadísticos son, los factores que nos llevaron a inclinar la balanza hacia R en lugar de hacia otras opciones.

Valorando esta decisión desde el punto de vista del Trabajo casi finalizado, estamos convencidos de que constituye un acierto: manejar un lenguaje de programación de propósito general como C – y sus derivados, evoluciones y librerías – nos hubiese obligado a emplear más tiempo y esfuerzo, llevando la computación desde el papel de herramienta que intencionalmente tiene en este proyecto hacia un lugar central, usurpando el protagonismo que corresponde al análisis de datos y la formulación de propuestas. Y algo similar hubiese podido ocurrir de habernos decantado por un lenguaje como FORTRAN, Mathematica o Maple, de grandes prestaciones científicas pero no tan conocido por nosotros como el elegido.

A continuación haremos una breve semblanza de cada uno de estos lenguajes, mientras que las tareas que se encargan a cada uno de ellos serán explicadas en el mismo apartado en el que se presenten los programas utilizados.

3.1.1. MATLAB

Una vez escogida esta opción, creemos oportuno profundizar un poco más en sus características y posibilidades.

Ya se ha mencionado en las páginas anteriores que MATLAB es un viejo conocido de la comunidad científica; la mano derecha de cualquier profesional que, de una u otra forma, se vea involucrado en realizar cálculos técnicos en las más diversas disciplinas.

No podemos hablar de este sistema sin explicar previamente cuál es el significado de su nombre: MATLAB proviene de la expresión inglesa “*MATrix LABoratory*”, que significa “laboratorio de matrices”. Esta denominación da una idea del uso al que está destinado, así como de las posibilidades que ofrecerá ... Los datos que nosotros manejamos en el ámbito de este trabajo, como veremos, constituyen una matriz de enormes dimensiones.

Su origen se encuentra en el año 1984, cuando Cleve Moler desarrolló un sistema para poder emplear subprogramas escritos en FORTRAN para el estudio de conceptos de Análisis Matemático y Álgebra Lineal, abstrayéndose de este último lenguaje, de modo que el usuario final no precisase conocerlo.

Sin embargo, hace tiempo dejó atrás el estudio teórico de las Matemáticas para convertirse, como estamos diciendo, en uno de los pilares de la investigación científica moderna: los ordenadores de numerosas centros de investigación así como las aulas de informática de multitud de universidades están dotadas de versiones de MATLAB, y el personal que allí desarrolla sus labores suele conocerlo bien, pues de ello dependen en gran parte los resultados de su estudio y/o trabajo.

A nivel de programación clásica, ofrece el lenguaje M, interpretado – es decir, que traduce las órdenes a medida que es requerido, a diferencia de los compilados, en los cuales la traducción es efectuada en una única ocasión, y englobando todas las órdenes – y orientado, tal y como venimos insistiendo, al manejo de variables matemáticas: es sencillo utilizar vectores y matrices, declarar valores complejos, e invocar comandos que implementan funciones matemáticas de uso común o especializado.

El usuario puede definir estas operaciones en la línea de comandos o agrupándolas en ficheros con la extensión “.m” – comúnmente denominados con la palabra inglesa “*script*” -, para ser ejecutadas todas como si de una sola se tratase: al escribir en consola el nombre de dicho fichero, MATLAB lo abrirá y lo ejecutará.

De hecho, se trata de la herramienta utilizada para establecer los resultados que comentaremos más adelante. En un mismo fichero, podemos leer los datos cargándolos en memoria, manejarlos, extraer los resultados deseados y presentarlos por pantalla. Todo sin un esfuerzo excesivo en el diseño y programación del *script*; algo que conviene evitar de cara a centrar la atención, tal y como hemos comentado más arriba, en el análisis de estos datos y en la propuesta de alternativas que mejoren la eficiencia energética.

Cabe comentar, además, que MATLAB ofrece Simulink, un entorno de programación visual en el que el usuario puede incluir elementos de muy variados tipos, definiendo las relaciones entre ellos. Además, esta herramienta incluye infinidad de librerías con elementos propios de ámbitos muy diversos: aeroespacial, animación 3D, redes neuronales, telecomunicaciones, ... En concreto, y dada su relación con el tema de este trabajo, cabe reseñar que en su librería Simscape dispone de bloques que simulan turbinas eólicas, así como en Aerospace Blockset aparecen algunos capaces de modelar el comportamiento del viento.

Tanto el lenguaje M como algunas librerías del entorno Simulink han sido usados durante la carrera de forma exhaustiva. Ya hemos dicho que, de acuerdo al

problema planteado, en esta ocasión sólo haremos uso del primero, pero en cualquier caso, es muy conveniente tener en cuenta que el segundo nos puede aportar muchas ventajas en caso de querer hacer un estudio más detallado del viento en una situación determinada.

3.1.2. R

Aunque necesarias, consideramos las tareas que llevaremos a cabo con R de un menor interés de cara a la realización de nuestro proyecto, por lo que daremos tan sólo unas breves pinceladas sobre el lenguaje R.

Podemos considerar al lenguaje S, creado en los laboratorios AT&T, como la semilla del desarrollo de este lenguaje. Más tarde, en 1993, desarrolladores de la Universidad de Auckland integrarían S con el lenguaje Scheme, dando lugar a lo que hoy conocemos como R.

Se trata de un lenguaje interpretado, al igual que M, que ofrece gran abundancia de funciones relacionadas con la Estadística y el análisis de datos.

Además, R ofrece la posibilidad de hacer interactuar su código con otros lenguajes de programación: C, C++, FORTRAN, ... y con distintos sistemas de bases de datos.

Y por otro lado, es posible ampliar sus posibilidades con extensiones, lo que permite que R sea una herramienta aún más versátil y flexible. De hecho, existe un repositorio oficial desde el cual los programadores pueden descargarlos para diseñar e implementar sus aplicaciones.

3.2. Ficheros de código utilizados

A continuación mostraremos los dos códigos que hemos usado para nuestros cálculos matemáticos.

El primero de ellos es un fichero que, conteniendo instrucciones en M, durante el desarrollo del Trabajo, ha recibido el nombre de *"buscarSuperiores.m"*. Esta denominación indica lo que hace: buscar el número de ocasiones en las que, cada una de las estaciones ha medido un valor de la velocidad del viento mayor de 10 m/s.

Una vez hecho esto, hace una serie de cálculos estadísticos que serán de utilidad en el posterior análisis de los datos.

El código es el que se muestra a continuación:


```
#####
#           BÚSQUEDA DE PUNTOS QUE SUPEREN UN UMBRAL DE           #
#           VELOCIDAD DEL VIENTO ESTABLECIDO                       #
# Trabajo de Fin de Grado GIEAI 2016                               #
# Alumno: Jesús E. Arnaiz Barrero                                  #
# Director: Francisco José Álvarez García                          #
#                                                                     #
# El programa lee las series de viento diario (datos: CFSR, 6h.,   #
# 1979 - 2010, Península Ibérica) y busca aquellos que superen un  #
# umbral de velocidad, contando cuántas veces lo hace, los ordena  #
# según ese criterio y realiza cálculos estadísticos.             #
#####
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%           PREPARACIÓN DEL ESPACIO DE TRABAJO:                     %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
clear all;
close all;
clc;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%           CARGA DE DATOS E INICIALIZACIÓN DE VARIABLES:         %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Lectura de los datos del fichero descargado y carga en memoria:
% "datos" es una matriz bidimensional de vectores: cada posición
% (indicada por su "longitud" y su "latitud") encontraremos un vector
% "muestras", con las medidas efectuadas por esa estación cada 6
% horas.
```

```
datos =
    ncread('C:\Documents and Settings\Jesus\Mis documentos\
    CFSR_windspeed_6h_peniber_1980_2009_DJF.nc','ws');
```

```
% Inicialización de variables:
dimensiones = size(datos);
longitudMaxima = dimensiones(1);
latitudMaxima = dimensiones(2);
numeroMuestras = dimensiones(4);
```

```
% Velocidad del viento en m/s a partir de la cual se considerará
% rentable su aprovechamiento:
limiteEficiencia = 10;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%           TRATAMIENTO DE LOS DATOS Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS:   %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Búsqueda de los puntos en los cuales la velocidad del viento supere
% el límite de eficiencia establecido:
```

```
for longitud = 1:longitudMaxima
    for latitud = 1:latitudMaxima
        % Posición absoluta en la matriz
        posicion = (longitud - 1)*latitudMaxima + latitud;
```

```
        % "contador" contendrá, para cada estación de medida, su
        % longitud, su latitud y el número de veces en el que las
        % muestras tomadas han superado el límite de eficiencia
        % establecido:
```

```

    contador(posicion).longitud = longitud;
    contador(posicion).latitud = latitud;
    contador(posicion).superiores = 0;

    % Recorrido del vector que hay cada posición de "datos":
    for muestra = 1:numeroMuestras
        if (datos(longitud,latitud,muestra) >= limiteEficiencia)
            contador(posicion).superiores =
                contador(posicion).superiores + 1;
        end
    end
end
end

% Número total de estaciones de medida cuyos datos están en el
% fichero:
numeroEstaciones = length(contador);

% Ordenación de los datos de "contador" según el orden (de mayor a
% menor) de los datos del campo "superiores":
for i = 1:numeroEstaciones;
    for j = 1:(numeroEstaciones - i);
        if (contador(j).superiores > contador(j+1).superiores)
            aux = contador(j);
            contador(j) = contador(j+1);
            contador(j+1) = aux;
        end
    end
end

% Creación del vector "vectorContadorSuperiores", que contendrá los
% valores del campo "superiores" de "contador" ordenados previamente:
for i = 1:numeroEstaciones
    vectorContadorSuperiores(i) = contador(i).superiores;
end

% Media:
media = mean(vectorContadorSuperiores);
fprintf(1,'media = %f\n',media);

% Desviación estándar:
desviacionEstandar = std(vectorContadorSuperiores);
fprintf(1,'desviación estándar = %f\n',desviacionEstandar);

% Mediana:
mediana = median(vectorContadorSuperiores);
fprintf(1,'mediana = %f\n',mediana);

% Cuartiles:
Q1 = quantile(vectorContadorSuperiores,0.25)
Q2 = quantile(vectorContadorSuperiores,0.5)
Q3 = quantile(vectorContadorSuperiores,0.75)

```

Por otro lado, el siguiente código ("*modificacionMetodoEOT.r*"), escrito en R, es el encargado de elegir puntos, calcular correlaciones y eliminar regresiones, a partir de los datos obtenidos gracias al anterior:

```
#####
#                               MODIFICACIÓN DEL MÉTODO DE E.O.T.:                               #
# Trabajo de Fin de Grado GIEAI 2016                                                         #
# Alumno: Jesús E. Arnaiz Barrero                                                             #
# Director: Francisco José Álvarez García                                                       #
#                                                                                                 #
# El programa va formando "patrones empíricos ortogonales"                                     #
# (E.O.T.s) partiendo de las series de viento diario (datos:                                   #
# CFSR, 6h., 1979-2010, Península Ibérica) en las                                             #
# localidades con mayor frecuencia de rebasamiento del                                         #
# umbral de 10 m/s (umbral elegido tras consultar la                                           #
# literatura como el que conduce a la máxima potencia, sin                                     #
# incremento apreciable ulterior para mayores velocidades).                                     #
#####

#####
#                               CARGA DE LAS LIBRERÍAS NECESARIAS:                               #
#####

library(ncdf)
library(ncdf4)
library(mapplots)
library(raster)

#####
#                               PREPARACIÓN DEL ESPACIO DE TRABAJO:                               #
#####

# Se especifica el directorio de trabajo:
setwd("~/WORK/TFG-JArnaiz")

#####
#                               LECTURA DE LOS DATOS:                                           #
#####

# Se leen los datos de la velocidad del viento:
infile1 <-
  "CFSR_windspeed_daily_peniber_1979_2010_SON_mask_anom.nc"

infile1.nc <- open.ncdf(infile1)
print(infile1.nc)

ws = get.var.ncdf(infile1.nc,"ws")
wslons = get.var.ncdf(infile1.nc,"lon")
wslats = get.var.ncdf(infile1.nc,"lat")

nlon = dim(wslons)
nlat = dim(wslats)
ntime = dim(ws)[3]

# Se constituye una matriz de dimensiones (NLONS*NLATS) x NTIME, con
# valores normalizados:
yws <- apply(ws,3,I)
std <- sqrt(apply(yws,1,function(x) sum(x^2)))
ywsnorm <- sweep(yws,1,std, '/')

# Lectura de datos por encima del umbral prefijado:
infile2 <-
```

```

"CFSR_windspeed_6h_peniber_1979_2010_SON_ge10_sum_mask.nc"

infile2.nc <- open.ncdf(infile2)
print(infile2.nc)
sup = get.var.ncdf(infile2.nc,"ws")
plim <- unname(quantile(sup,0.95,na.rm = TRUE ))

# Inicio del bucle de búsqueda de modos:
nmax <- 10          # Número máximo de modos, establecido arbitrariamente
                    # en 10; validez comprobada posteriormente.
n <- 1

# Inicialización de las matrices:
correl <- array(0,dim=c(dim(yws)[1],nmax))
expvar <- array(0,dim=nmax)
pc <- array(0,dim=c(dim(yws)[2],nmax))
iloc <- array(0,dim=c(2,nmax))

while(n <= nmax){

  # Toma de serie de intensidad del viento en las ubicaciones de
  # mayor frecuencia de superación del umbral (punto base del
  # modo):
  iws <-
    c(array(which(sup == max(sup,na.rm = TRUE),
      arr.ind = TRUE ) [1,]))
  iloc[,n] <- iws
  if (n == 1) {
    var <- 100
  } else {
    var <-
      100*(1-
        (sum(correlxy[iloc[1,n],iloc[2,n],1:n-1]^2)))
  }

  if (var > 50 && sup[iws[1],iws[2]] > plim){
    xws <- ws[iws[1],iws[2],]
    xwsnorm <- xws/sqrt(sum(xws^2))
    pc[,n] <- xwsnorm

    # Cálculo del mapa de correlaciones del dominio con
    # la serie de punto base:
    correl[,n] <- array((ywsnorm%*%xwsnorm) [,1])

    # Determinación de la varianza explicada por el modo
    # (%):
    expvar[n] <- 100*sum(
      correl[,n]^2,na.rm=T)/dim(correl)[1]

    # Retira de la matriz de intensidades de viento
    # normalizadas la proyección sobre la serie del punto
    # base:

    alpha <- array(yws%*%xwsnorm)
    yws <- yws - alpha%o%xwsnorm

    # Recupera dimensiones (NLONS x NLATS x NTIME):

```

```

ws <- array(yws,c(nlon,nlat,ntime))
correlxy <- array(correl,c(nlon,nlat,nmax))

# Reemplaza el máximo de frecuencia de superación del
# umbral por cero:
sup[iws[1],iws[2]] <- 0
} else {
  if (sup[iws[1],iws[2]] < plim) {
    # Revisa si todos los puntos por encima del
    # percentil "plim" seleccionado han sido
    # utilizados ya:
    iloc[,n] <- c(0,0)
    n <- nmax
  } else {
    # Omite esta iteración y retira este punto del
    # proceso:
    n <- n -1
    sup[iws[1],iws[2]] <- 0
  }
  n <- n+1
} # Fin del bucle.

#####
#      ESCRITURA DE LOS DATOS DE CORRELACIÓN EN FORMATO "NETCDF":      #
#####

npat <- sum(iloc[1,] != 0)
correlxy[is.na(correlxy)] <- 1.e+30
lon <-
  var.inq.ncdf(infile1.nc,varid =
    varid.inq.ncdf(infile1.nc,"lon"))
lon <- dim.def.ncdf(lon$name,lon$units,wslons,unlim = FALSE)
lat <-
  var.inq.ncdf(infile1.nc,varid =
    varid.inq.ncdf(infile1.nc,"lat"))
lat <- dim.def.ncdf(lat$name,lat$units,wslats,unlim = FALSE)
time <-
  var.inq.ncdf(infile1.nc,varid =
    varid.inq.ncdf(infile1.nc,"time"))
time <- dim.def.ncdf(time$name,time$units,1:npat,unlim = TRUE)
pat <-
  var.def.ncdf("ws","m/s",list(lon,lat,time),
    missval = 1e+30, longname = "Correlation pattern",
    prec = "single")
outfile <- create.ncdf("correlation_maps_daily_ws_SON.nc",pat)
put.var.ncdf(outfile , pat , correlxy , start = c (1,1,1) ,
count = c(-1,-1, npat) , verbose = TRUE)

# Se cierra el fichero:
close.ncdf(outfile)
close.ncdf(infile1.nc)

#####
#      ESCRITURA DE LOS MAPAS DE REGRESIÓN DE ALTURA      #
#      GEOPOTENCIAL DE 1000 HPA ("Z1000"):      #
#####

```

```

# Se leen los datos de "Z1000":
pcmatrix <- pc[,1:npat]
infile3 <-
    "CFSR_hgt1000_daily_nat_1979_2010_noleapyr_anom_SON.nc"
infile3.nc <- nc_open(infile3)
print (infile3.nc)

hgt = ncvar_get(infile3.nc,"gh")
hgtlons = ncvar_get(infile3.nc,"lon")
hgtlats = ncvar_get(infile3.nc,"lat")
hgttime = ncvar_get(infile3.nc,"time")

nlonhgt <- dim(hgtlons)
nlathgt <- dim(hgtlats)
ntimehgt <- dim(hgt)[3]

# Se forma la matriz (NLONS*NLATS)xNTIME:
vhgt <- apply(hgt,3,I)
hgtpat <- (vhgt%*%pcmatrix)/sqrt(ntimehgt-1)

# Se recuperan las dimensiones de NLONSxNLATSxNPC:
hgtpatxyt <- array(hgtpat,c(nlonhgt,nlathgt,npat))
lon <-
    dim.def.ncdf(infile3.nc$dim$lon$name,
        infile3.nc$dim$lon$units,hgtlons,unlim = FALSE)
lat <-
    dim.def.ncdf(infile3.nc$dim$lat$name,
        infile3.nc$dim$lat$units,hgtlats,unlim = FALSE)

time <-
    dim.def.ncdf(infile3.nc$dim$time$name,
        infile3.nc$dim$time$units,c(1:npat),unlim = TRUE)

# Se escriben los datos:
pat <-
    var.def.ncdf("hgt","m",list(lon,lat,time),
        missval = 1.e+30, longname = "Z1000 pattern",
        prec = "single")
outfile <- create.ncdf("hgt1000_pat_SON.nc",pat)
put.var.ncdf(outfile , pat , hgtpatxyt , start = c(1,1,1) ,
    count = c(-1,-1,-1) ,verbose = TRUE)

# Se cierra el fichero:
close.ncdf(outfile)
nc_close(infile3.nc)

#####
#           ESCRITURA DE LOS MAPAS DE REGRESIÓN DE ALTURA           #
#           GEOPOTENCIAL DE 2500 HPA ("Z2500"):                       #
#####

# Se leen los datos de "Z2500":
infile3 <-
    "CFSR_hgt500_daily_nat_1979_2010_noleapyr_anom_SON.nc"

infile3.nc <- nc_open(infile3)
print (infile3.nc)

```

```

hgt =ncvar_get(infile3.nc,"gh")
hgtlons = ncvar_get(infile3.nc,"lon")
hgtlats = ncvar_get(infile3.nc,"lat")
hgttime = ncvar_get(infile3.nc,"time")

nlonhgt <- dim(hgtlons)
nlathgt <- dim(hgtlats)
ntimehgt <- dim(hgt)[3]

# Se forma la matriz(NLONS*NLATS)xNTIME:
vhgt <- apply(hgt,3,I)
hgtpat <- (vhgt%*%pcmatrix)/sqrt(ntimehgt-1)

# Se recuperan las dimensiones de NLONSxNLATSxNPC:
hgtpatxyt <- array(hgtpat,c(nlonhgt,nlathgt,npat))
lon <-
  dim.def.ncdf(infile3.nc$dim$lon$name,
    infile3.nc$dim$lon$units,hgtlons,unlim = FALSE)
lat <-
  dim.def.ncdf(infile3.nc$dim$lat$name,
    infile3.nc$dim$lat$units,hgtlats,unlim = FALSE)

time <-
  dim.def.ncdf(infile3.nc$dim$time$name,
    infile3.nc$dim$time$units,c(1:npat),unlim = TRUE)

# Se escriben los datos:
pat <-
  var.def.ncdf("hgt","m",list(lon,lat,time),missval = 1.e+30,
    longname = "Z500 pattern", prec = "single")
outfile <-
  create.ncdf("hgt500_pat_SON.nc",pat)
put.var.ncdf(outfile , pat , hgtpatxyt , start = c(1,1,1) ,
  count = c(-1,-1,-1) ,verbose = TRUE)

# Se cierra el fichero:
close.ncdf(outfile)
nc_close(infile3.nc)

```


4. Resumen y conclusiones

En el presente trabajo se han indagado las posibilidades de interconexión entre distintas áreas de la Península Ibérica con el objetivo de mitigar la intermitencia en la generación de energía eólica. El método aplicado se caracteriza por su sencillez y por la ventaja frente a otras alternativas empleadas de no imponer condiciones de ortogonalidad espacial en las configuraciones resultantes, evitando el consiguiente riesgo de aparición de elementos espúreos en ellas, y de representarlas mediante series temporales que reflejan de modo fidedigno la mayor parte de las variaciones de intensidad del viento en las localizaciones identificadas como puntos base de los modos en que se descompone el campo analizado, que se seleccionan a partir de las ubicaciones con un mayor potencial eólico dentro del dominio, reconocido por una mayor frecuencia de vientos de intensidad suficiente para alcanzar la parte superior de la curva de potencia de las turbinas convencionales.

Ha de subrayarse aquí que el análisis no ha tomado en consideración la posible superación del umbral de intensidad de vientos (típicamente, 25 m/s) a partir del cual los álabes se disponen en bandera y se interrumpe el funcionamiento del molino, con el fin de evitar esfuerzos perjudiciales en su estructura. Este factor podría ser incorporado a la técnica aquí propuesta simplemente eliminando en los puntos del dominio considerado los intervalos de vientos excesivos, no computables para la determinación del potencial eólico.

El análisis efectuado indica que los extremos nororiental y sur de la Península ofrecen posibilidades de mejora de la estabilidad del suministro si se interconectan sus contribuciones, no correlacionadas entre sí y asociadas a modos que se identifican en las cuatro estaciones del año. Cabe destacar que ambos modos se encuentran ligados a zonas de vientos intensos en la fenomenología característica de la Península Ibérica, en concreto con el área de la tramontana que recorre el noreste peninsular, y con la región de levante en el Estrecho de Gibraltar, lo que indica que ambos regímenes reciben una representación adecuada en los reanálisis utilizados. Además de estas dos opciones vigentes a lo largo de todo el año, nuestra técnica señala otros candidatos, no correlacionados entre sí ni con los anteriores, para la regularización de la generación eólica, si bien se debilitan en al menos una de las estaciones del año: consisten en el modo del noroeste peninsular, con punto base en el Cantábrico occidental, y el modo del sur de la costa portuguesa, con punto base en el Cabo de la Roca. El resto de modos, bien tienen su punto base en áreas extra-peninsulares, bien explican una fracción comparativamente pequeña de varianza en él, o bien cobran importancia únicamente en una estación del año.

La valoración de la estabilización del suministro realizada aquí posee un carácter cualitativo y se basa en la determinación de modos que por construcción no

están correlacionados, aunque las condiciones adicionales impuestas garantizan que la serie del punto base retiene la mayor parte de las fluctuaciones reales, según se indicó más arriba.

Este trabajo tenía por meta la presentación de la técnica y su aplicación ilustrativa a un conjunto de datos. Su desarrollo posterior exigirá, por ejemplo, cuantificar la mayor fiabilidad de la generación con las opciones de interconexión seleccionadas en términos, por ejemplo, de la potencia firme que arrojarían, traduciendo los datos de viento a valores de potencia para un modelo concreto de turbina. Para este cómputo resultaría aconsejable emplear una información de mayor resolución, tanto temporal como espacial, de los vientos estudiados, que podría obtenerse a partir de simulaciones con modelos regionales, siguiendo los pasos de trabajos previos con metodologías diferentes a la aquí propuesta.

5. Agradecimientos

Este Trabajo constituye la última asignatura del Grado. Por ello, aunque la ortodoxia aconsejaría limitar el reconocimiento a las personas que han colaborado en la realización de este proyecto, no creo inadecuado hacerlo extensivo a todos aquellos que, de uno u otro modo, han aparecido en el camino que termina el día de hoy.

En primer lugar, a mis padres. Ellos han estado ahí cada uno de esos días en los que “no voy a aprobar” tal o cual examen, esas noches en las que el vertiginoso ritmo de los estudios adaptados al Proceso de Bolonia me obligaban a trasnochar más de lo recomendable, ... y el título que espero obtener hoy es, sin duda, en parte suyo.

Este Trabajo no hubiese sido posible, desde luego, sin la intervención y el apoyo de Francisco José Álvarez García, Paco, a quien conocí hace unos años como profesor de Mecánica de Fluidos. Gracias a su dirección y a su ayuda con los trámites administrativos, este Trabajo Fin de Grado es una realidad.

Hablando de profesores, son unos cuantos en los que he encontrado un apoyo que va más allá de lo profesional, y con los que las conversaciones han dejado atrás la Ciencia y la Ingeniería para encontrar un consejo, un apoyo o alguien que te escucha en un momento dado. Además de Paco, tengo que recordar a Bonifacio Castaño Martín, que hizo que las Matemáticas en general – y el Cálculo en particular - dejaran de ser un mal necesario para tomar un nuevo papel como materia entretenida. Y, cómo no, a los integrantes de la Pastoral Universitaria – mayoritariamente profesores, pero también algún alumno – que, con su responsable Paco Rupérez a la cabeza, me han hecho compartir agradables momentos – menos de los deseados - siempre y cuando las obligaciones nos lo permitían a uno y a otros.

El camino hasta este día hubiese sido sin duda más arduo y duro sin la colaboración de algunos de mis compañeros. Siempre estarán en el recuerdo los ratos y experiencias compartidos con ellos: las clases, las prácticas de laboratorio, los ratos de biblioteca antes de los exámenes, las charlas de pasillo o los viajes de ida y vuelta ... También serán imposibles de olvidar a las horas de estudio dedicadas a perseguir el sueño compartido con ellos de obtener un día este título de grado. Aunque de corazón, espero que los primeros recuerdos de los que he hablado prevalezcan sobre los segundos.

En momentos como este, es justo dar gracias a Dios por la oportunidad que me ha dado de llegar hasta aquí. Y a las muchas personas que han rezado por mí. Y, cómo no, a mi amigo el Ingeniero Industrial Isidoro Zorzano Ledesma por sus ayudas.

Estamos ante el final de un grado, lo cual supone un logro profesional y académico. Sin embargo, no sería justo olvidar a esos amigos que, con su compañía y su apoyo, han hecho más llevaderos estos años, a la vez que me han impedido olvidar

que antes que alumnos y profesionales, somos personas con una serie de sentimientos y valores más relevantes que una nota o un título.

6. Bibliografía

European Wind Energy Association - EWEA (2015). *Aiming High – Report 2015*, 40 pp.

Jerez, S., Trigo, R. M., Vicente-Serrano, S. M., Pozo-Vázquez, D., Lorente-Plazas, R., Lorenzo-Lacruz, J., y Montávez, J. P. (2013). *The impact of the North Atlantic Oscillation on renewable energy resources in southwestern Europe*. *Journal of applied meteorology and climatology*, 52(10), 2204-2225.

Kriesche, P., y Schlosser, C. A. (2013). *The Association of Large-Scale Climate Variability and Teleconnections on Wind Energy Resource over Europe and its Intermittency*. MIT Joint Program, report 250, 46 pp.

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H. L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., y Liu, H. (2010). *The NCEP climate forecast system reanalysis*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015.

Van den Dool, H. M., Saha, S., y Johansson, Å. (2000). *Empirical orthogonal teleconnections*. *Journal of Climate*, 13(8), 1421-1435.

S. Astariz, G. Iglesias. *Output power smoothing and reduced downtime period by combined wind and wave energy farms*. *Energy* 97 (2016), 69-81.

Alexander Buttler, Felix Dinkel, Simon Franz, Hartmut Spliethoff. *Variability of wind and solar power – An assessment of the current situation in the European Union based on the year 2014*. *Energy* 106 (2016), 147-161.

D.J. Cannon, D.J. Brayshaw, J. Methven, P.J. Coker, D. Lenaghan. *Using reanalysis data to quantify extreme wind power generation statistics: A 33 year case study in Great Britain*. *Renewable Energy* 75 (2015), 767-778.

David James Brayshaw, Alberto Troccoli, Rachael Fordham, John Methven. *The impact of large scale atmospheric circulation patterns on wind power generation and its potential predictability: A case study over the UK*. *Renewable Energy* 36 (2011), 2087-2096.

F. Gutiérrez-Martín, R.A. Da Silva-Álvarez, P. Montoro-Pintado. *Effects of wind intermittency on reduction of CO₂ emissions: The case of the Spanish power system. Energy* 61 (2013), 108-117.

Alexandra Cosseron, Udaya Bhaskar Gunturu and C. Adam Schlosser. *Characterization of the wind power resource in Europe and its intermittency. Energy Procedia*, 40(2013), 58–66.

F.J. Santos-Alamillos, D. Pozo-Vázquez, J.A. Ruiz-Arias, V. Lara-Fanego, J. Tovar-Pescador. *A methodology for evaluating the spatial variability of wind energy resources: Application to assess the potential contribution of wind energy to baseload power. Renewable Energy* 69 (2014), 147-156.

F.J. Santos-Alamillos, D. Pozo-Vázquez, J.A. Ruiz-Arias, V. Lara-Fanego, J. Tovar-Pescador. *Analysis of Spatiotemporal Balancing between Wind and Solar Energy Resources in the Southern Iberian Peninsula. Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51(11) (2012) 2005-2024.

H. Lund. *Large-scale integration of optimal combinations of PV, wind and wave power into the electricity supply. Renewable Energy* 31 (2006) 503–515.

Félix Avia (CENER). *La energía eólica*. Energía y medio ambiente, 24. Fundación Gas Natural Fenosa, 2012.

Orden CIN/351/2009, de 9 de febrero, por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial (disponible en: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2009-2893).

Normativas reguladoras del Trabajo Fin de Grado (disponibles en: <http://escuelapolitecnica.uah.es/estudiantes/trabajo-fin-grado.asp>):

- Normativa general de Trabajos fin de Grado de la Universidad de Alcalá;

- Normativa específica de Trabajo fin de Grado en la Escuela Politécnica Superior;
- Anexos a la normativa específica de Trabajos Fin de Grado.

<http://dle.rae.es/?id=FGD8otZ>

<http://www.energiaysociedad.es/ficha/3-5-regulacion-espanola-de-las-energias-renovables>

<http://www.energiasrenovablesinfo.com/eolica/energia-eolica-ventajas-inconvenientes/>

www.ree.es/es/estadisticas-del-sistema-electrico-espanol/indicadores-nacionales/series-estadisticas

<https://es.wikipedia.org/wiki/MATLAB>

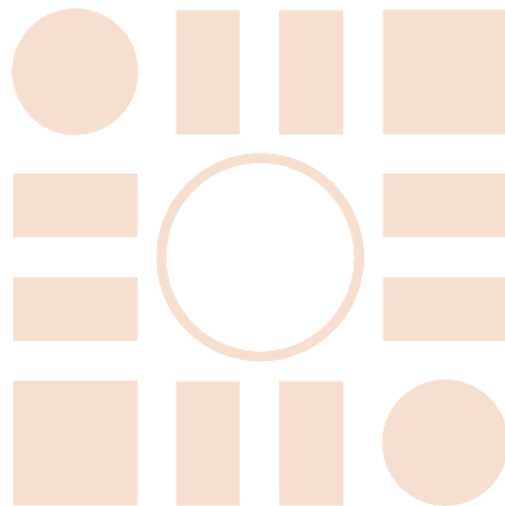
[https://es.wikipedia.org/wiki/R_\(lenguaje_de_programaci%C3%B3n\)#Caracter.C3.ADsticas](https://es.wikipedia.org/wiki/R_(lenguaje_de_programaci%C3%B3n)#Caracter.C3.ADsticas)

<http://www.genbetadev.com/formacion/r-un-lenguaje-y-entorno-de-programacion-para-analisis-estadistico>

<http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.1/>

<http://www.fundeu.es/wp-content/uploads/2013/05/CursivasGuiaFundeu.pdf>

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR



Universidad
de Alcalá